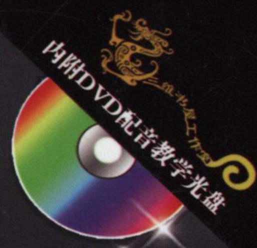


计算机辅助分析（CAE）系列
JISUANJIFUZHUFENXI(CAE)XILIE



ADAMS 2012 虚拟样机从入门到精通

全面完整的知识体系
深入浅出的理论阐述
循序渐进的分析讲解
实用典型的实例引导

随书配送 DVD 光盘。 包含全书所有实例的源文件素材， 并制作了全部实例的制作过程动画 AVI 文件和效果图演示。 可以帮助读者更加形象直观、 轻松自在地学习本书。



三维书屋工作室
刘晋霞 胡仁喜 康士廷 等编著



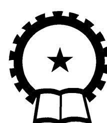

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

ADAMS 2012
虚拟样机从入门到精通

三维书屋工作室
刘晋霞　胡仁喜　康士廷　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书以最新版的ADAMS——ADAMS 2012为对象，系统介绍了包括新增功能在内的ADAMS的基本功能和一些简单的建模与仿真实例，主要包括多体系统动力学与ADAMS基本操作、创建约束、施加载荷、建模与仿真、计算结果后处理、参数化建模及优化设计，并在此基础上介绍了机械工程开发中最常用的几个专业模块，即ADAMS/Vibration振动模块、ADAMS/Controls控制模块、ADAMS/Car车辆模块。

由于ADAMS属于比较难掌握的高端CAE软件，而且其最新版本在界面风格、工具栏设置、操作步骤等方面都比以往版本有很多变化，所以作者专门随书配送了多媒体学习光盘，包括全书实例源文件和所有实例的操作过程动画文件，可以帮助读者更加形象直观地学习本书内容。

图书在版编目（CIP）数据

ADAMS 2012虚拟样机从入门到精通/刘晋霞等编著. —2版.
—北京：机械工业出版社，2013.4（2014.9重印）
ISBN 978-7-111-42513-7

Ⅰ.①A… Ⅱ.①刘… Ⅲ.①机械工程—计算机仿真—应用软件 Ⅳ.①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字（2013）第100380号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）
责任编辑：曲彩云
责任印制：刘 岚
北京中兴印刷有限公司印刷
2014年9月第2版第2次印刷
184mm×260mm · 23.5印张 · 582千字
3 001—4 500册
标准书号：ISBN 978-7-111-42513-7
ISBN 978-7-89405-005-2（光盘）
定价：59.00元（含1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
社服务中心：(010)88361066
销 售 一 部：(010)68326294
销 售 二 部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203

网络服务
教 材 网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

前 言

虚拟样机技术（Virtual Prototyping Technology）通过 CAD/CAM/CAE 等技术手段把产品资料集成到一个可视化环境中，实现产品的仿真、分析。使用 ADAMS 等系统仿真软件，可以在各种虚拟环境中真实地模拟系统的运动，不断修改设计缺陷以改进系统，直至获得最优设计方案，最终做出比较理想的物理样机。

ADAMS（Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System）软件，是由美国机械动力公司（Mechanical Dynamics Inc.）开发的最优秀的机械系统动态仿真软件，是目前世界上最具权威性、使用范围最广的机械系统动力学分析软件之一。ADAMS 软件广泛应用于航空航天、汽车工程、铁路车辆及装备、工业机械、工程机械等领域。国外的一些著名大学也已开设了介绍 ADAMS 软件的课程，将三维 CAD 软件、有限元软件和虚拟样机软件作为机械专业学生必须了解的工具软件。一方面，ADAMS 是机械系统动态仿真软件的应用软件，用户可以运用该软件非常方便地对虚拟样机进行静力学、运动学和动力学分析；另一方面，ADAMS 又是机械系统动态仿真分析开发工具，其开放性的程序结构和多种接口，可以成为特殊行业用户进行特殊类型机械系统动态仿真分析的二次开发工具。ADAMS 与先进的 CAD 软件（UG，Pro/ENGINEER）和 CAE 软件（ANSYS）可以通过计算机图形交换格式文件相互交换以保持数据的一致性。ADAMS 软件支持并行工程环境，节省大量的时间和经费。利用 ADAMS 软件建立参数化模型可以进行设计研究、试验设计和优化分析,为系统参数优化提供了一种高效开发工具。

本书以最新版的 ADAMS——ADAMS 2012 为对象，系统介绍了包括新增功能在内的 MD ADAMS 的基本功能和一些简单的建模与仿真实例，主要包括多体系统动力学与 ADAMS 基本操作、创建约束、施加载荷、建模与仿真、计算结果后处理、参数化建模及优化设计，并在此基础上介绍了机械工程开发中最常用的几个专业模块，即 ADAMS/Vibration 振动模块、ADAMS/Controls 控制模块、ADAMS/Car 车辆模块。

由于 ADAMS 属于比较难掌握的高端 CAE 软件，所以作者专门随书配送了多媒体学习光盘，包括全书实例源文件和所有实例的操作过程动画文件，可以帮助读者更形象直观地学习本书内容。

本书主要由山东科技大学机电学院的刘晋霞老师和军械工程学院的胡仁喜老师以及康士廷老师主编，同时参加本书编写的还有刘昌丽、张日晶、孟培、万金环、杨雪静、郑长松、张俊生、李瑞、董伟、王玉秋、王敏、王玮、王义发、王培合、路纯红、周冰、王艳池等。由于编者水平有限，时间仓促，本书难免在内容选材和叙述上有欠缺之处。望广大读者登录网站 www.sjzsanweishuwu.com或发送邮件到win760520@126.com批评指正，编者将不胜感激。

作　者

目　录

前言
第 1 章　ADAMS分析基本理论 1
1.1　多体系统动力学基础理论 2
1.1.1　多体系统动力学研究进展 2
1.1.2　多体系统动力学方程的结构形式 3
1.1.3　多体系统动力学方程的数值求解 4
1.2　多刚体系统动力学模型 5
1.3　多柔体系统动力学模型 7
1.3.1　任意点的位置、速度和加速度 7
1.3.2　多柔体系统动力学方程 8
1.4　ADAMS动力学建模与求解 12
1.4.1　ADAMS采用的建模方法 12
1.4.2　ADAMS的方程求解方案 15
1.4.3　ADAMS采用的碰撞模型 18
第 2 章　ADAMS模块介绍 20
2.1　虚拟样机技术 21
2.2　多学科分析技术 22
2.3　ADAMS软件基本模块 23
2.3.1　ADAMS/View（用户界面模块） 23
2.3.2　ADAMS/Solver（求解器模块） 25
2.3.3　ADAMS/PostProcessor（后处理模块） 25
2.3.4　ADAMS/Insight（试验设计与分析模块） 27
2.4　ADAMS软件扩展模块 28
2.4.1　ADAMS/Controls（控制模块） 28
2.4.2　ADAMS/Vibration（振动分析模块） 29
2.4.3　ADAMS/Flex（柔性分析模块） 30
2.4.4　ADAMS/Durability（耐久性分析模块） 30
2.5　ADAMS软件接口模块 31
2.5.1　ADAMS/Exchange（图形接口模块） 31
2.5.2　CAT/ADAMS（CATIA专业接口模块） 31
2.5.3　Mechanical/Pro（Pro/E接口模块） 32
2.6　ADAMS软件专用领域模块 32
2.6.1　ADAMS/Car（轿车模块） 32
2.6.2　ADAMS/Driveline（动力传动系统模块） 34
2.6.3　ADAMS/Tire（轮胎模块） 34
2.6.4　FTire Modle（柔性环轮胎模块） 35
2.6.5　ADAMS/FBG（柔性体生成器模块） 35

2.6.6 EDM（经验动力学模型） 36
2.6.7 ADAMS/Chassis（FORD汽车公司专用模块） 36
2.7 ADAMS软件工具箱 37
2.7.1 ADAMS/SDK（ADAMS开发工具包） 37
2.7.2 Tracked/Wheeled Vehicle（履带/轮胎式车辆工具箱） 37
2.7.3 ADAMS/Gear Tool（齿轮传动工具箱） 38
第 3 章 建立模型 39
3.1 ADAMS/View命令操作 40
3.1.1 启动ADAMS/View 40
3.1.2 ADAMS/View界面 43
3.2 几何建模 46
3.2.1 几何建模基础知识 46
3.2.2 建模前的准备工作 47
3.2.3 几何建模工具 50
3.2.4 创建基本几何体 51
3.2.5 创建实体几何模型 56
3.2.6 创建复杂几何图形 62
3.2.7 创建柔性梁 68
3.2.8 修改几何体 69
3.2.9 修改构件特性 71
3.3 实例——小球碰撞 73
3.3.1 平台建模 74
3.3.2 小球建模 75
3.3.3 滑块建摸 76
3.3.4 球瓶建模 76
3.3.5 曲柄建模 79
3.3.6 连杆建模 80
第 4 章 创建约束 81
4.1 约束类型 82
4.2 约束和自由度 82
4.3 约束的命名 82
4.4 约束工具 82
4.5 常用约束 83
4.5.1 常用理想约束 83
4.5.2 施加螺旋副 85
4.5.3 施加齿轮副 85
4.5.4 施加耦合副 86
4.5.5 修改理想运动副 87
4.6 虚约束 88

4.7 创建高副 90
4.8 定义机构运动 92
4.8.1 机构运动类型 92
4.8.2 创建运动副运动 93
4.8.3 创建点运动 94
4.8.4 添加约束的技巧 95
4.9 应用实例——曲柄滑块机构 96
4.9.1 启动ADAMS/View 96
4.9.2 设置建模环境 97
4.9.3 几何建模 98
4.9.4 添加约束 100
4.9.5 运动仿真 102
第 5 章 施加载荷 103
5.1 载荷类型及定义方法 104
5.1.1 基本载荷类型 104
5.1.2 定义载荷值和方向的方法 104
5.2 施加载荷 104
5.2.1 施加单方向作用力 105
5.2.2 施加分量作用力 106
5.3 柔性连接 108
5.3.1 拉压弹簧阻尼器 108
5.3.2 扭转弹簧阻尼器 109
5.3.3 轴套力 110
5.3.4 无质量梁 111
5.3.5 力场 114
5.4 创建接触 115
第 6 章 计算结果后处理 118
6.1 ADAMS/PostProcessor简介 119
6.1.1 ADAMS/PostProcessor的用途 119
6.1.2 启动与退出ADAMS/PostProcessor 119
6.1.3 ADAMS/PostProcessor窗口介绍 120
6.2 ADAMS/PostProcessor基本操作 121
6.2.1 创建任务和添加数据 121
6.2.2 工具栏的使用 122
6.2.3 窗口模式的设置 125
6.2.4 ADAMS/PostProcessor的页面管理 125
6.3 ADAMS/PostProcessor输出仿真动画 125
6.3.1 动画类型 126
6.3.2 加载动画 126

6.3.3 动画演示 127
6.3.4 时域动画的控制 127
6.3.5 频域动画的控制 129
6.3.6 记录动画 130
6.4 ADAMS/PostProcessor绘制仿真曲线 130
6.4.1 曲线图的类型 130
6.4.2 曲线图的建立 131
6.4.3 曲线图上的数学计算 133
6.5 曲线图的处理 135
6.5.1 曲线数据滤波 135
6.5.2 快速傅里叶变换 136
6.5.3 生成博德图 137
6.6 实例——汽车的前悬架系统运动仿真 137
6.6.1 动力学模型的建立和仿真分析 137
6.6.2 采用ADAMS/PostProcessor生成曲线图 138
6.6.3 采用ADAMS/PostProcessor操作曲线图 140
第 7 章 建模与仿真实例 142
7.1 曲柄连杆机构 143
7.1.1 运行ADAMS 143
7.1.2 设置建模环境 144
7.1.3 几何建模 145
7.1.4 建立约束 147
7.1.5 设置初始状态 149
7.1.6 进行仿真 149
7.1.7 测量仿真结果 150
7.2 单摆机构 153
7.2.1 运行ADAMS 153
7.2.2 建立摆臂 154
7.2.3 设置摆臂质量 155
7.2.4 设置摆臂位置 156
7.2.5 建立单摆支点 156
7.2.6 设置初始运动 156
7.2.7 验证模型 157
7.2.8 设置A点支撑力的测量 158
7.2.9 运行仿真 158
7.2.10 得到支撑力 159
7.3 凸轮机构 159
7.3.1 运行ADAMS 160
7.3.2 建立凸轮部件 161

7.3.3 建立转动副 162
7.3.4 建立其他部件 162
7.3.5 建立平动副 164
7.3.6 添加线一线约束 165
7.3.7 添加运动约束 165
7.3.8 验证模型 165
7.3.9 建立测量 166
7.3.10 运行仿真 167
7.4 自由降落的石块 168
7.4.1 启动ADAMS 168
7.4.2 建立模型 169
7.4.3 建立测量 170
7.4.4 验证模型 172
7.4.5 运行仿真 173
7.5 投射石块 175
7.5.1 启动ADAMS 176
7.5.2 建立模型 176
7.5.3 建立测量 178
7.5.4 进行仿真 178
7.6 斜面上的滑块 181
7.6.1 启动ADAMS 181
7.6.2 建立模型 182
7.6.3 添加约束 185
7.6.4 建立测量 185
7.6.5 验证模型 186
7.6.6 运行仿真 187
7.6.7 改进模型 187
7.7 起重机 190
7.7.1 启动ADAMS 191
7.7.2 建立模型 192
7.7.3 添加约束 197
7.7.4 添加运动 199
7.8 弹簧阻尼器 202
7.8.1 启动ADAMS 202
7.8.2 建立模型 202
第 8 章 参数化建模及优化设计 211
8.1 ADAMS参数化建模 212
8.2 ADAMS参数化分析 212
8.2.1 设计研究（Design Study） 212

8.2.2 试验设计（Design of Experiments） 213
8.2.3 优化分析（Optimization） 214
8.3 参数化建模实例——夹紧机构 215
8.3.1 夹紧机构模型简介 215
8.3.2 启动ADAMS/View设置操作环境 216
8.3.3 建立夹紧机构模型 218
8.3.4 测试模型 223
8.3.5 验证模型 226
8.4 优化设计实例——夹紧机构 227
8.4.1 模型参数化 227
8.4.2 设计研究 228
8.4.3 优化设计与分析 231
第 9 章 ADAM/SInsight试验优化设计 234
9.1 运行ADAMS/Insight 235
9.2 参数化分析与回归分析 240
9.2.1 参数化分析 240
9.2.2 参数化过程 244
9.2.3 回归分析 253
9.3 蒙特卡罗方法应用 263
第 10 章 振动分析 268
10.1 建立模型 270
10.2 模型仿真 272
10.3 建立输入通道 273
10.4 建立输出通道 277
10.5 测试模型 278
10.6 验证模型 279
10.6.1 绘制系统模态 279
10.6.2 动画显示固有模态 282
10.6.3 动画显示受迫振动分析结果 284
10.6.4 绘制频率响应 285
10.6.5 绘制功率谱密度 288
10.6.6 绘制模态坐标 288
10.7 精化模型 290
10.7.1 受迫振动分析 290
10.7.2 动画显示固有模态 291
10.7.3 绘制受迫振动频率响应 292
10.8 优化模型 294
10.8.1 1%的总阻尼 294
10.8.2 2%，3%，4%，5%的总阻尼 296

第 11 章　控制仿真 299
11.1　ADAMS/Controls设计流程 300
11.2　ADAMS/Controls应用实例 301
11.2.1　导入天线模型 302
11.2.2　加载ADAMS/Controls模块 304
11.2.3　运行实验仿真 304
11.2.4　取消驱动 304
11.2.5　核实输入变量 306
11.2.6　核实输出变量 307
11.2.7　导出ADAMS模型 308
11.3　ADAMS/Controls和MATLAB集成建模 309
11.3.1　开启MATLAB 309
11.3.2　创建控制系统模型 311
11.3.3　搭建控制系统模型 311
11.3.4　设置仿真参数 312
11.3.5　运行模型仿真 313
11.3.6　绘制仿真结果 314
第 12 章　汽车系统仿真 316
12.1　用户创建模板 317
12.2　创建悬挂系统 317
12.2.1　创建前悬挂子系统 318
12.2.2　创建悬挂和转向系统 321
12.2.3　定义车辆参数仿真 323
12.2.4　绘制仿真曲线 324
12.2.5　分析基本推力 325
12.2.6　定义和施加载荷文件 325
12.2.7　绘制仿真曲线 327
12.2.8　修改悬挂系统与转向系统 329
12.2.9　分析修改后的系统模型 329
12.2.10　比较分析结果 330
12.2.11　删除仿真和绘图 331
12.3　分析弹性体对悬挂装配的影响 331
12.3.1　创建悬挂装配 331
12.3.2　创建弹性体 333
12.4　包含弹性体的整车装配 334
12.4.1　创建整车装配 334
12.4.2　交换MNF文件 336
12.5　创建轮胎模型 338
12.5.1　轮胎模型简介 338

12.5.2 ADAMS/Tire 339
12.5.3 轮胎模型的选择 340
12.5.4 ADAMS/Tire的使用 341
12.6 整车动力学仿真分析 341
12.6.1 单移线 342
12.6.2 常半径转向 345
12.6.3 双移线仿真 349
12.7 ADAMS/Insight在ADAMS/Car中的使用 350
附录A 设计过程函数 355
附录B 运行过程函数 362

第 1 章

ADAMS 分析基本理论

本章分别详细介绍了多刚体系统动力学和多柔体系统动力学的建模方法，并在此基础上介绍了 ADAMS 求解多体系统动力学模型的原理、方法，最后对 ADAMS 的计算流程进行了说明。

学 习 要 点

- 多体系统动力学基础理论
- 多刚体系统动力学模型
- 多柔体系统动力学模型
- ADAMS 动力学建模与求解

1.1 多体系统动力学基础理论

多体系统动力学的核心问题是建模和求解问题,其系统研究开始于 20 世纪 60 年代。从 60 年代到 80 年代，侧重于多刚体系统的研究，主要是研究多刚体系统的自动建模和数值求解；到了 80 年代中期，多刚体系统动力学的研究已经取得了一系列的成果，尤其是建模理论趋于成熟，但更稳定、更有效的数值求解方法仍然是研究的热点；80 年代以后，多体系统动力学的研究更偏重于多柔体系统动力学，这个领域也正式被称为计算多体系统动力学，并且至今仍然是力学研究中最有活力的分支之一，但已经远远地超过了一般力学的涵义。

1.1.1 多体系统动力学研究进展

多体系统动力学研究的两个最基本的理论问题是建模方法和数值求解。多体系统动力学的早期研究对象是多刚体系统，这部分内容到 20 世纪 80 年代已发展得比较完善。多刚体系统动力学建模的出发点涉及了许多矢量力学和分析力学方法。

1．矢量力学方法

（1）牛顿−欧拉（Newton-Euler）方程。该方法将单个刚体的 N-E 方程推广到多刚体系统，物理概念鲜明，建立方程直接。在分析过程中，若需要增加体的数目，只需续增方程数目，无需另建动力学方程组。有些文献称之为“具有良好的开放性”。但它的一个极大的弱点是消除约束力十分困难。后来人们又发现，在采用递推型式时，递推的 Newton-Euler 法运算量最小。因此，Newton-Euler 法一直受到一些作者的注意。近年来，有影响的是 Schiehlen 以及 Schwertassek 等人的工作，刘延柱采用矩阵记法列写旋量形式的 Newton-Euler 方程，使动力学方程具有极简明的表达形式。

（2）罗伯森−维滕堡（Roberson-Wittenburg）方法。该方法的特点是将图论原理应用于多刚体系统的描述得到适用于不同结构的公式，易处理的树形系统，从而对计算进行简化。

2．分析力学方法

（1）拉格朗日（Lagrange）方程。该方法将经典的 Lagrange 方程用于多刚体系统，使未知变量的个数减小到最低程度且程式化，但计算动能函数及其导数的工作极其繁琐，而引入计算机符号运算则会方便一些。与之类似的还有海默方程、阿贝尔方程等。

（2）凯恩（Kane）方程。由于该方法引入了以广义速率代替广义坐标描述系统的运动，并将力矢量向特定的基矢量方向投影以消除理想约束力，因而可以直接对系统列写运动微分方程而不必考虑各刚体间理想约束的情况，兼有牛顿−欧拉方程和拉格朗日方程的优点。

（3）变分法。该方法不需要建立系统的运动微分方程，可直接应用优化计算方法进行动力学分析。

对考虑部件弹性变形的多柔体系统，自 20 世纪 80 年代后期在建模方法上也渐趋成熟。柔性多体系统动力学的数学模型与多刚体系统、结构动力学有一定的兼容性。当系统中的柔性变形可以不计时，柔性多体系统退化为多刚体系统；当部件间的大范围运动不存在时，退化为结构动力学问题。对柔性多体系统，通常用浮动坐标系描述物体的大范围运动，弹性体相对于浮动坐标系的离散将采用有限单元法与现代模态综合分析方法，这就是 P.W.Likins 最早采用的描述柔性多体系统的混合坐标法。据此再根据力学基本原理进行推导，就可将多刚体系统动力学方程拓展到多柔体系统。

根据各种力学基本原理得到的形式不同的动力学方程，尽管在理论上方程等价，但其数值形态的优劣却不尽相同。

1.1.2　多体系统动力学方程的结构形式

对多刚体系统，自 20 世纪 60 年代以来，从各自研究对象的特征出发，航天与机械两大工程领域分别提出了不同的建模策略，主要区别是对刚体位形的描述。

在航天领域，以系统每个铰的一对邻接刚体为单元，以一个刚体为参考物，另一个刚体相对该刚体的位形由铰的广义坐标（拉格朗日坐标）来描述。这样树系统的位形完全可由所有铰的拉氏坐标阵 q 所确定。其动力学方程形式为拉氏坐标阵的二阶微分方程组，即：

$$A\ddot{q} = B \qquad (1\text{-}1)$$

这种形式的优点是方程个数最少，但方程呈严重非线性，A、B 矩阵形式相当复杂，程式化时要包含描述系统拓扑的信息，对非树形系统，需求解约束方程。对于需要求出约束反力的系统来说，这种形式反而不理想。在有些文献中，称这种形式为第一类方法（模型）。由于反馈控制变量一般是相对坐标变量，在带控制的多体系统动力学分析中一般采用第一类方法，在传统的火炮与自动武器动力学分析中一般也采用第一类方法。

机械领域是以系统每一个物体为单元，建立固接在刚体上的坐标系，刚体的位形均相对于一个公共参考基进行定义，其位形坐标统一为刚体坐标系基点的笛卡儿坐标与坐标系的姿态坐标，一般情况下为 6 个。由于铰的存在，这些位形坐标不独立，系统动力学方程的一般形式为：

$$\begin{cases} \mathrm{A}\ddot{q} + \phi_q{}^{\mathrm{T}}\lambda = \mathrm{B} \\ \phi(q,\ t) = 0 \end{cases} \qquad (1\text{-}2)$$

式中，ϕ 为位形坐标阵 q 的约束方程；ϕ_q 为约束方程的雅可比矩阵；λ 为拉氏乘子。

式（1-2）是一个维数相当大的代数-微分混合方程组。但由于此时方程组的系数矩阵呈稀疏状，可利用稀疏矩阵的特点进行快速数值计算，提高数值算法的效率。在约束方程以约束库形式存入计算机的情况下，这种形式便于对复杂系统的自动建模，适用于大型通用软件的编程，Haug 称之为动力学分析的基本方法。利用该方法可根据需要求出任何约束的约束反力。在有些文献中，也称这种形式为第二类方法（模型）。

将多刚体系统动力学方程拓展到多柔体系统，方程的结构形式也如同上述两种形式。

1.1.3　多体系统动力学方程的数值求解

由多体力学方程的结构形式可知，多体力学仿真数值求解的核心通常是对常微分方程初值问题的处理。其公式如下：

$$\begin{cases} \dot{y} = f(t,\ y) \\ y(t = t_0) = y(t_0) \end{cases} \tag{1-3}$$

求解式（1-3）的基本途径有以下 3 种：

（1）化导数为差商的方法，即用差商来近似代替导数，从而得到数值解序列。具有代表性的是各种欧拉方法。

（2）数值积分法，将方程化成积分形式，利用梯形、龙贝格、高斯等数值积分方法得到解序列。

（3）利用泰勒公式的近似求解。典型的方法是各阶龙格-库塔公式。另外，为了充分利用有用信息，进一步提高计算结果的精度，还提出了线形多步法来代替单步法的思想，典型的如亚当姆斯（Adams）法和哈明（Hamming）法。

由于在方程求解时经常会遇到系统的特征值在数值上相差若干个数量级的情况，描述这种系统的微分方程，称为刚性（Stiff）方程。对这种方程的处理必须采用特殊的方法，现在常用的方法有隐式或半隐式 Kunge-Kutta 法、自动变阶变步长的 Gear 法、隐式或显式 Adams 法等，而且对于线性病态系统，还可以用增广矩阵法和蛙跳算法等。

多柔体系统在数值计算时，慢变大幅变量与快变微幅变量的耦合会导致方程严重的病态，这个问题已成为多柔体系统动力学发展的一个“瓶颈”，引起了学者们的普遍关注。Gear 方法被认为是求解刚性微分方程的很有效的办法，但用到多柔体系统动力学方程上有很大的不便，即 Gear 方法需计算方程右端项的 Jacobian 矩阵，这对复杂多柔体系统动力学方程而言，几乎是难以做到的。

1.2　多刚体系统动力学模型

随着多体动力学的发展，目前应用于多刚体系统动力学的方法主要有以下几种：牛顿-欧拉法(Newton-Euler)、拉格朗日方程法、图论(R-W)法、凯恩法、变分法、旋量法等。在求解机械系统（多体系统）动力学控制方程时，常常（如 ADAMS 软件等）采用 3 种功能强大的变阶和变步长积分求解程序，即 BDF、Gstiff 和 Dstiff 来求解稀疏耦合的非线性微分—代数方程。ADAMS 用刚体 i 的质心笛卡儿坐标和反映刚体方位的欧拉角（或广义欧拉角）作为广义坐标，即 $q_i = \left[x, y, z, \psi, \theta, \varphi\right]_i^{\mathrm{T}}$，$q = \left[q_1^{\mathrm{T}}, \cdots, q_n^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$。采用拉格朗日乘子法建立系统运动方程：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right)^{\mathrm{T}}-\left(\frac{\partial T}{\partial q}\right)^{\mathrm{T}}+f_q^{\mathrm{T}}\rho+g_{\dot{q}}^{\mathrm{T}}\mu=Q \tag{1-4}$$

完整约束方程时： $f\left(q,t\right)=0$

非完整约束方程时： $g\left(q,\dot{q},t\right)=0$

式中，T为系统动能；Q为系统广义坐标列阵； ρ 为对应于完整约束的拉氏乘子列阵；M为对应于非完整约束的拉氏乘子列阵；$\dot{q}$为系统广义速度列阵。

定义1　系统动力学方程：对于有N个自由度的力学系统，确定N个广义速率以后，即可计算出系统内各质点及各刚体相应的偏速度及偏角速度，以及相应的N个广义主动力及广义惯性力。令每个广义速率所对应的广义主动力与广义惯性力之和为零，所得到的N个标量方程即称为系统的动力学方程，也称为凯恩方程：

$$F^{(r)}+F^{*(r)}=0 \quad (r=1,2,\cdots,N) \tag{1-5}$$

写成矩阵形式为：

$$F+F^{*}=0 \tag{1-6}$$

式中F、F^{*}为N阶列阵。

定义为：$F=\left[F^{(1)}\cdots F^{(N)}\right]^{\mathrm{T}}$　　$F^{*}=\left[F^{*(1)}\cdots F^{*(N)}\right]^{\mathrm{T}}$

在系统运动方程（1-4）中令：$u=\dot{q}$，$\dot{u}=\ddot{q}$。

则系统运动方程可化成动力学方程为：

$$F\left(q,u,\dot{u},\lambda,t\right)=0 \tag{1-7}$$

$$G\left(u,\dot{q}\right)=u-\dot{q}=0 \tag{1-8}$$

$$\varPhi\left(q,t\right)=0 \tag{1-9}$$

式中，u为广义速度列阵；λ为约束反力及作用力列阵；G为描述广义速度的代数方程列阵；$\varPhi$为描述约束的代数方程列阵。

定义2　Gear预估—校正多步算法：继承ADAMS四阶预估—校正变阶算法，采用变步长法，其步骤如下：

（1）f(x，t)的Jacobi矩阵的计算。

（2）校正的迭代运算，第二步运行时要适当给出迭代精度与单步积分精度，否则会出现迭代收敛所要求的步长小于单步积分精度要求的步长，造成计算步长反复放大缩小。

定义系统的状态矢量$y=\left[q^{\mathrm{T}},u^{\mathrm{T}},\lambda^{\mathrm{T}}\right]$，用Gear算法求解系统运动方程，根据当前时刻的系统状态矢量值，用Taylor级数预估下一个时刻系统的状态矢量值：

$$y_{n+1}=y_n+\frac{\partial y_n}{\partial t}h+\frac{1}{2!}\frac{\partial^2 y_n}{\partial t^2}h^2+\cdots \tag{1-10}$$

其中时间步长$h=t_{n+1}-t_n$，这种预估算法得到新的时刻的系统状态矢量值通常不准确，可由Gear法K + 1阶积分进行校正：

$$y_{n+1} = -h\beta_0 \dot{y}_{n+1} + \sum_{i=1}^{k} \alpha_i y_{n-i+1} \qquad (1\text{-}11)$$

式中 y_{n+1} 是 $y(t)$ 在 $t = t_{n+1}$ 时的近似值，β_0, α_i 为 Gear 积分系数值，也可写成：

$$\dot{y}_{n+1} = \frac{-1}{h\beta_0}\left[y_{n+1} - \sum_{i=1}^{k} \alpha_i y_{n-i+1} \right] \qquad (1\text{-}12)$$

则系统动力学方程在 $t = t_{n+1}$ 时刻展开，得：

$$F\left(q_{n+1}, u_{n+1}, \dot{u}_{n+1}, \lambda_{n+1}, t_{n+1}\right) = 0 \qquad (1\text{-}13)$$

$$G\left(u_{n+1}, \dot{q}_{n+1}\right) = u_{n+1} - \dot{q}_{n+1} = u_{n+1} - \left(\frac{-1}{h\beta_0}\right)\left(q_{n+1} - \sum_{i=1}^{k} \alpha_i q_{n-i+1}\right) = 0 \qquad (1\text{-}14)$$

$$\Phi\left(q_{n+1}, t_{n+1}\right) = 0 \qquad (1\text{-}15)$$

定义 3　Newton—Raphson算法：求解非线性方程组 Φ（x）= 0，其中共有 n 个方程，即：Φ =（$\Phi_1 \cdots \Phi_n$）^{T}，变量 x 阵为 n 阶列阵。N-R算法的关键是如何选取适当的初值，如果矩阵为非奇异，则解是唯一的。使用修正的N-R算法求解上述非线性方程，其迭代校正公式为：

$$F_j + \frac{\partial F}{\partial q}\Delta q_j + \frac{\partial F}{\partial u}\Delta u_j + \frac{\partial F}{\partial \dot{u}}\Delta \dot{u}_j + \frac{\partial F}{\partial \lambda}\Delta \lambda_j = 0 \qquad (1\text{-}16)$$

$$G_j + \frac{\partial G}{\partial q}\Delta q_j + \frac{\partial G}{\partial u}\Delta u_j = 0 \qquad (1\text{-}17)$$

$$\Phi_j + \frac{\partial \Phi}{\partial q}\Delta q_j = 0 \qquad (1\text{-}18)$$

式中 j 表示第 j 次迭代，$\Delta q_j = q_{j+1} - q_j, \Delta u_j = u_{j+1} - u_j, \Delta \lambda_j = \lambda_{j+1} - \lambda_j$

由式（1-12）知：$\Delta \dot{u}_j = -\left(\frac{1}{h\beta_0}\right)\Delta u_j$

由式（1-14）知：$\frac{\partial G}{\partial q} = \left(\frac{1}{h\beta_0}\right) I$，$\frac{\partial G}{\partial u} = I$

则写成矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial q} & \left(\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{1}{h\beta_0}\frac{\partial F}{\partial \dot{u}}\right) & \left(\frac{\partial \Phi}{\partial q}\right)^T \\ \left(\frac{1}{h\beta_0}\right) I & I & 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial q} & 0 & 0 \end{bmatrix}_j \begin{Bmatrix} \Delta q \\ \Delta u \\ \Delta \lambda \end{Bmatrix}_j = \begin{Bmatrix} -F \\ -G \\ -\Phi \end{Bmatrix}_j \qquad (1\text{-}19)$$

式中，左边的系数矩阵称为系统的 Jacobi 矩阵；$\frac{\partial F}{\partial q}$ 是系统的刚度矩阵；$\frac{\partial F}{\partial u}$ 是系统阻

尼矩阵；$\frac{\partial F}{\partial \dot{u}}$是系统质量矩阵。通过分解系统 Jacobi 矩阵求解$\Delta q_j, \Delta u_j, \Delta \lambda_j$，计算出$q_{j+1}, u_{j+1}, \lambda_{j+1}, \dot{q}_{j+1}, \dot{u}_{j+1}, \dot{\lambda}_{j+1}$，重复上述步骤，直到满足收敛条件，判定积分误差限，确定是否接受该解。

1.3 多柔体系统动力学模型

1.3.1　任意点的位置、速度和加速度

柔性体系统中的坐标系如图 1-1 所示，包括惯性坐标系（$\boldsymbol{e}^r$）和动坐标系（$\boldsymbol{e}^b$）。前者不随时间变化，后者是建立在柔性体上，用于描述柔性体的运动。动坐标系可以相对惯性坐标系进行有限的移动和转动。动坐标系在惯性坐标系中的坐标（移动、转动）称为参考坐标。

与刚体不同，柔性体是变形体，体内各点的相对位置时时刻刻都在变化，只靠动坐标系不能准确描述该柔性体在惯性坐标系中的位置，因此，引入弹性坐标来描述柔性体上各点相对动坐标系统的变形。这样柔性体上任一点的运动就是动坐标系的“刚性”运动与弹性变形的合成运动。由于柔体上各点之间有相对运动，所以动坐标系的选择不是采用连体坐标系，而需要采用随着柔性体形变而变化的坐标系，即“浮动坐标系”。

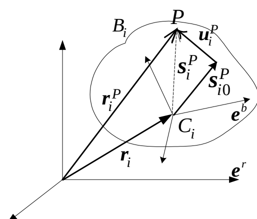


图 1-1　柔性体上节点 P 的位置

在研究多柔体系统时，合适的坐标系是非常重要的。在确定浮动坐标系时有两点准则：便于方程建立求解；柔性体刚体运动与变形运动的耦合尽量小。目前常见的浮动坐标系大致有 5 种：局部附着框架、中心惯性主轴框架、蒂斯拉德框架、巴克凯恩斯框架以及刚体模态框架，采用哪一种视实际情况而定。

在分析刚体平面运动的时候，把复杂的刚体平面运动分解为几种简单的运动。在对柔性体的运动，尤其是在小变形的情况下，也可以采用类似的方法。如某柔性体从位置 L1 运动到位置 L2，其间运动可以分解为：刚性移动→刚性转动→变形运动。对于柔性体上任意一点 P，其位置向量为：

$$r = r_0 + A(s_p + u_p) \tag{1-20}$$

式中，r 为 P 点在惯性坐标系中的向量，r_0 为浮动坐标系原点在惯性坐标系中的向量；A

为方向余弦矩阵；s_p 为柔性体未变形时 P 点在浮动坐标系中的向量；u_p 为相对变形向量，u_p 可以用不同的方法离散化，与讨论平面问题相同，对于点 P，该单元的变形采用模态坐标来描述，有：

$$u_p = \boldsymbol{\Phi}_p q_f \tag{1-21}$$

式中 $\boldsymbol{\Phi}_p$ 为点 P 满足里兹基向量要求的假设变形模态矩阵；q 为变形的广义坐标。

柔性体上任一点的速度向量及加速度向量，可以对式（1-20）求对时间的一阶导数和二阶导数得到：

$$\dot{\boldsymbol{r}}^p = \dot{\boldsymbol{r}}_0 + \dot{A}(s_p + u_p) + A\boldsymbol{\Phi}_p \dot{q}_f \tag{1-22}$$

$$\ddot{r}^p = \ddot{r}_0 + \ddot{A}(s_p + u_p) + 2\dot{A}\boldsymbol{\Phi}_p \dot{q}_f + A\boldsymbol{\Phi}_p \ddot{q}_f \tag{1-23}$$

1.3.2　多柔体系统动力学方程

1．外加载荷

在 ADAMS 软件中，外加载荷包括单点力与扭矩、分布式载荷以及残余载荷 3 部分。

（1）单点力与扭矩。施加于柔性体上某一标记点的单点力和扭矩必须投影到系统的广义坐标上才能起作用，力和扭矩以矩阵形式写出，在标记点 K 的局部坐标系下表示为：

$$F_K = [f_x \quad f_y \quad f_z]^{\mathrm{T}}，T_K = [t_x \quad t_y \quad t_z]^{\mathrm{T}} \tag{1-24}$$

广义力 $\boldsymbol{Q}$ 由广义平动力、广义扭矩（以欧拉角表示的广义力）和广义模态力组成，可表示为：

$$Q = [Q_T \quad Q_R \quad Q_M]^{\mathrm{T}} \tag{1-25}$$

平动坐标下的广义力可以通过转换单点力 F_K 到全局坐标基 $\boldsymbol{e}^r$ 下来获得，即：

$$Q_T = A\ F_K \tag{1-26}$$

式（1-26）中，A 为标记点 K 上的坐标系相对于全局坐标的欧拉角变换矩阵，可以表示为：$A_{gk} = A_{gb}A_{bp}A_{pk}$，如图 1-2 所示，$A_{gb}$ 为局部坐标系 B 点相对于全局坐标系的转换矩阵，即方向余弦阵；A_{bp} 为因节点 P 的小变形引起的标记坐标的方位变化而引入的转换矩阵；A_{pk} 为定义在柔性体上标记点处的坐标系相对于 P 点坐标系的常值变换矩阵。

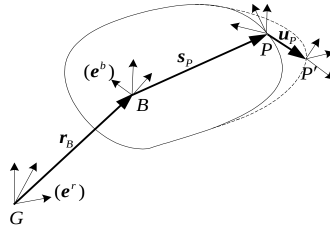


图 1-2　柔性体变形模型

作用在柔性体标记点处的合力矩，可用相对于全局坐标的矢量矩阵表达为：

$$T_{tot} = A_{gk}T_K + p \times A_{gk}F_K \tag{1-27}$$

式中，p 为从局部坐标基 $\boldsymbol{e}^b$ 到受力点处的位移矢量，用斜方阵表示，上式可改写为：

$$T_{tot} = A_{gk}T_K + \tilde{p}A_{gk}F_K \tag{1-28}$$

将物理坐标系下的力矩向基于欧拉角的坐标系转换，并利用式 $\omega_B = B\dot{\psi}$ ，可得广义合力矩为：

$$Q_R = [AB]^T[A_{gk}T_K + \tilde{p}A_{gk}F_K] \tag{1-29}$$

通过投影单点力和单点力矩到模态坐标上，可得到 P 点处的广义模态力。

如在标记点 K 处施加力 $\boldsymbol{F}_K$ 和力矩 $\boldsymbol{T}_K$，通过转换到全局坐标上，即有：$F_I = A_{gk}F_K$，$T_I = A_{gk}T_K$，并将 $\boldsymbol{F}_I$ 投影到平动模态坐标、将 T_I 投影到角模态坐标上，可得广义模态力：

$$Q_F = \boldsymbol{\Phi}_P^{\mathrm{T}}F_I + \boldsymbol{\Phi}_P^{*\mathrm{T}}T_I \tag{1-30}$$

式中，$\boldsymbol{\Phi}_P$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_P^*$ 对应于节点 P 处的平动和转动自由度的模态斜方阵。由于模态矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 只定义在节点，故单点力和单点力矩只能施加于节点处。

（2）分布式载荷。在 ADAMS 软件上，分布式载荷可以通过 MFORCE 的方式来创建。通常在 FEM 软件中有运动方程：

$$M\ddot{x} + Kx = F \tag{1-31}$$

式中，M 和 K 为柔性体上有限单元的质量和刚度矩阵；x 和 F 为物理节点的自由度矢量和载荷矢量。

利用模态矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 将式（1-31）转换到模态坐标 $\boldsymbol{q}$ 下，有：

$$\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}M\boldsymbol{\Phi}\ddot{q} + \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}K\boldsymbol{\Phi}q = \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}F \tag{1-32}$$

上式可简化为：

$$\hat{M}\ddot{q} + \hat{k}q = f \tag{1-33}$$

式中，$\hat{M}$ 和 $\hat{K}$ 分别为广义质量和刚度矩阵；f 为模态载荷矢量。

节点力矢量在模态坐标上的投影为：

$$f = \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}F \tag{1-34}$$

式中如果 $\boldsymbol{F}$ 是时间的函数则求解时计算开销太大，一种替代的方法是假设空间依赖性和时间依赖性可以分开，把载荷 $\boldsymbol{F}$ 看成一系列依赖于时间的静态载荷的线性组合，即：

$$F(t) = s_1(t)F_1 + \cdots + s_n(t)F_n \tag{1-35}$$

载荷在模态坐标上的投影计算可在有限元文件 MNF 过程中完成，而不必在 ADAMS 仿真中重复进行。如果定义一系列静载荷为载荷矢量，并使其与系统响应显性相关，即表示成 $f(q,t)$ 的形式，则模态力又可表示为：

$$f(q,t) = s_n(q,t)f_1 + \cdots + s_n(q,t)f_n \tag{1-36}$$

（3）残余载荷。先前的假设是施加的载荷向模态坐标的投影已实现，即式（1-34）

成立。然而由于模态截断，很多情况下施加的力并不能进行投影，这些力被称为残余载荷，可以将其看为已投影到了被截断的高阶模态坐标上。残余载荷可表示为：

$$\Delta F = F - [\boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}]^{-1} f \qquad (1\text{-}37)$$

与残余载荷相关的是残余矢量，可看成是把残余载荷施加于柔性体时产生的变形。残余矢量可被当作模态振型加入到 Craig-Bampton 模态基中，增强的模态基完全能够捕捉残余载荷，否则，残余力的丢失不可避免。

2．多柔体系统的能量

（1）动能和质量矩阵。考虑节点 P 变形前后的位置、方向和模态，柔性体的广义坐标可以表示为：

$$\boldsymbol{\xi} = [x \quad y \quad z \quad \psi \quad \theta \quad \phi \quad q_i(i=1,\cdots,M)]^{\mathrm{T}} = [\boldsymbol{r} \quad \boldsymbol{\psi} \quad \boldsymbol{q}]^{\mathrm{T}} \qquad (1\text{-}38)$$

速度表达式（2-19）在系统广义坐标式（1-38）的时间导数 $\dot{\boldsymbol{\xi}}$ 中表示为：

$$v_P = [I \quad -A(s_p \tilde{+} u_p)B \quad A\boldsymbol{\Phi}_P]\dot{\xi} \qquad (1\text{-}39)$$

柔性体的动能为：

$$T = \frac{1}{2}\int_V \rho v^{\mathrm{T}} v dV \approx \frac{1}{2}\sum_P m_P v_P^{\mathrm{T}} v_P + \omega_P^{GBT} I_P \omega_P^{GB} \qquad (1\text{-}40)$$

式中，m_P 和 $\boldsymbol{I}_P$ 分别为节点 P 的节点质量和节点惯性张量；$\omega_P^{GB} = B_P \dot{\psi}$，为点 B 相对于全局坐标基的角速度在局部坐标基中的斜方阵表示。将式（1-39）和关系式 $\omega_P = B_P \dot{\psi}$ 代入式（1-40），得到动能的广义表达式：

$$T = \frac{1}{2}\dot{\xi}^{\mathrm{T}} M(\xi)\dot{\xi} \qquad (1\text{-}41)$$

上式中的质量矩阵 $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\xi})$ 为 3×3 维的方阵，表示为：

$$M(\xi) = \begin{bmatrix} M_{tt} & M_{tr} & M_{tm} \\ M_{tr}^{\mathrm{T}} & M_{rr} & M_{rm} \\ M_{tm}^{\mathrm{T}} & M_{rm}^{\mathrm{T}} & M_{mm} \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}42)$$

其中下标 t,r,m 分别表示平动、旋转和模态自由度。质量矩阵的 6 个独立分量分别表示为：

$$\begin{cases} M_{tt} = \tau^1 I \\ M_{tr} = -A[\tau^2 \tilde{+} \tau_j^3 q_j]B \\ M_{tm} = A\tau^3 \\ M_{rr} = B^{\mathrm{T}}[\tau^7 - [\tau_j^8 + \tau_j^{8\mathrm{T}}]q_j - \tau_{ij}^9 q_i q_j]B \\ M_{rm} = B^{\mathrm{T}}[\tau^4 + \tau_j^5 q_j] \\ M_{mm} = \tau^6 \end{cases} \qquad (1\text{-}43)$$

式（1-43）中可以明显看出质量矩阵与模态坐标显性相关，而且由于引入转换矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{B}$，质量矩阵也与系统的方向坐标显性相关。质量矩阵中的 9 个惯性时不变矩阵

$\tau^1 \sim \boldsymbol{\tau}^9$ 可通过计算有限元模型的 N 个节点信息在预处理过程中一次性得到，从而简化运动微分方程的求解。节点信息包括：每个节点的质量 m_P，未变形时的位置矢量 $\boldsymbol{s}_P$ 以及模态矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_P$。

其中 9 个惯性时不变矩阵见表 1-1。

（2）势能和刚度矩阵。势能一般分为重力势能和弹性势能两部分，可用下列二次项表示：

$$W = W_g(\xi) + \frac{1}{2}\xi^{\mathrm{T}} K \xi \qquad (1\text{-}44)$$

在弹性势能中，K 是对应于模态坐标 q 的结构部件的广义刚度矩阵，通常为常量。重力势能 W_g 表示为：

$$W_g = \int_W \rho r_P \cdot g\mathrm{d}W = \int_W \rho[r_B + A(s_P + \Phi_P q)]^{\mathrm{T}} g\mathrm{d}W \qquad (1\text{-}45)$$

式中，g 表示重力加速度矢量，重力 $\boldsymbol{f}_g$ 可对 W_g 求导得：

表 1-1　惯性时不变矩阵列表

惯性时不变矩阵	模态坐标数	维数
$\tau^1 = \sum^N m_P$		标量
$\boldsymbol{\tau}^2 = \sum_{P=1}^N m_P \boldsymbol{s}_P$		(3×1)
$\boldsymbol{\tau}_j^3 = \sum_{P=1}^N m_P \boldsymbol{\Phi}_P$	$j=1,\cdots,M$	$(3\times M)$
$\tau^4 = \sum_{P=1}^N m_P \tilde{s}_p \boldsymbol{\Phi}_P + I_P \boldsymbol{\Phi}'_P$		$(3\times M)$
$\tau_j^5 = \sum_{P=1}^N m_P \tilde{\boldsymbol{\Phi}}_{pj} \boldsymbol{\Phi}_P$	$j=1,\cdots,M$	$(3\times M)$
$\tau^6 = \sum_{P=1}^N m_P \boldsymbol{\Phi}_P^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}_P + \boldsymbol{\Phi}_P'^{T} I_P \boldsymbol{\Phi}'_P$		$(M\times M)$
$\tau^7 = \sum_{P=1}^N m_P \tilde{s}_p{}^{\mathrm{T}} \tilde{s}_p + I_P$		(3×3)
$\tau_j^8 = \sum_{P=1}^N m_P \tilde{s}_p \tilde{\boldsymbol{\Phi}}_{pj}$	$j=1,\cdots,M$	(3×3)
$\boldsymbol{\tau}_{jk}^9 = \sum_{P=1}^N m_P \tilde{\boldsymbol{\Phi}}_{pj} \tilde{\boldsymbol{\Phi}}_{pk}$	$j,k=1,\cdots,M$	(3×3)

$$\boldsymbol{f}_g=\frac{\partial W_g}{\partial \xi}=\begin{bmatrix}[\int_W \rho \mathrm{d}W]\boldsymbol{g}\\ \frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial \xi}[\int_W \rho(\boldsymbol{s}_P+\boldsymbol{\Phi}_P\boldsymbol{q})^{\mathrm{T}}\mathrm{d}W]\boldsymbol{g}\\ \boldsymbol{A}[\int_W \rho \boldsymbol{\Phi}_P^{\mathrm{T}}\mathrm{d}W]\boldsymbol{g}\end{bmatrix} \tag{1-46}$$

（3）能量损失和阻尼矩阵。阻尼力依赖于广义模态速度并可以从下列二次项中推导得出：

$$\Gamma=\frac{1}{2}\dot{q}^{\mathrm{T}}D\dot{q} \tag{1-47}$$

上式称为 Rayleigh 能量损耗函数。矩阵 $\boldsymbol{D}$ 包含阻尼系数 d_{ij}，它是常值对称阵。当引入正交模态振型时，阻尼矩阵可用对角线为模态阻尼率 c_i 的对角阵来表示。对于每一个正交模态的阻尼率都可以取不同值，而且还能以该模态的临界阻尼 c_i^{cr} 比值形式给出。

3．多柔体动力学方程

柔性体的运动方程从下列拉格朗日方程导出：

$$\begin{cases}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}})-\frac{\partial L}{\partial \xi}+\frac{\partial \Gamma}{\partial \dot{\xi}}+[\frac{\partial \boldsymbol{\Psi}}{\partial \boldsymbol{\xi}}]^{\mathrm{T}}\lambda-\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{\Psi}=\boldsymbol{0}\end{cases} \tag{1-48}$$

式中，$\boldsymbol{\Psi}$ 为约束方程；λ 为对应于约束方程的拉氏乘子；$\boldsymbol{\xi}$ 为如式（1-38）定义的广义坐标；$\boldsymbol{Q}$ 为投影到 $\boldsymbol{\xi}$ 上的广义力；L 为拉格朗日项，定义为 $L=T-W$，T 和 W 分别表示动能和势能；Γ 为能量损耗函数。

将求得的 T,W,Γ 代入式（1-48），得到最终的运动微分方程为：

$$M\ddot{\xi}+\dot{M}\dot{\xi}-\frac{1}{2}[\frac{\partial M}{\partial \xi}\dot{\xi}]^{\mathrm{T}}\dot{\xi}+K\xi+f_g+D\dot{\xi}+[\frac{\partial \Psi}{\partial \xi}]^{\mathrm{T}}\lambda=Q \tag{1-49}$$

式中，$\boldsymbol{\xi},\dot{\boldsymbol{\xi}},\ddot{\boldsymbol{\xi}}$ 为柔性体的广义坐标及其时间导数；$\boldsymbol{M},\dot{\boldsymbol{M}}$ 为柔性体的质量矩阵及其对时间的导数；$\frac{\partial \boldsymbol{M}}{\partial \xi}$ 为质量矩阵对柔性体广义坐标的偏导数，是 $(M+6)\times(M+6)\times(M+6)$ 维张量；M 为模态数。

1.4 ADAMS 动力学建模与求解

1.4.1 ADAMS 采用的建模方法

ADAMS 采用的是欧拉—拉格朗日方法。其结构形式属于第二类模型。拉格朗日方法广泛应用于多刚体力学，Chace 选取系统内每个刚体的质心在惯性参考系中的 3 个直角坐标和欧拉角为笛卡尔广义坐标，编制了 ADAMS 程序。Haug 选取系统内每个刚体的质心

在惯性参考系中的 3 个直角坐标和欧拉参数为笛卡尔广义坐标，编制了 DADS 程序。由于在选定坐标后，利用带乘子的拉格朗日方程处理后导出的以笛卡尔广义坐标为变量的动力学方程是与广义坐标数目相同的带乘子的微分方程，所以所得的多刚体动力学模型是混合的微分-代数方程组，特点是方程数目相当大，且常为刚性的。萘斯在 ADAMS 中用了吉尔（Gear）等的刚性积分算法，并采用了稀疏矩阵技术提高了计算效率。

1．ADAMS 多刚体方程基础

（1）动能。

平动动能为：

$$K_t = \frac{1}{2}\{\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z}\} M \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} M \left\{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2\right\} = \frac{1}{2} M \dot{r}^2 \qquad (1\text{-}50)$$

式中，M 为刚体质量；$\dot{r}$ 为刚体质心速度矢量。

转动动能为：

$$K_r = \frac{1}{2}\{\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z\} \begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix} = \frac{1}{2}\left(I_{xx}\omega_x{}^2 + I_{yy}\omega_y{}^2 + I_{zz}\omega_z{}^2\right) \qquad (1\text{-}51)$$

式中，ω 为刚体角速度；I 为刚体转动惯量。

总动能为：

$$K = K_t + K_r \qquad (1\text{-}52)$$

（2）动量。

与广义坐标 q_j 相关联的广义动量为：

$$P_{qj} = \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \qquad (1\text{-}53)$$

平动动量 P_x，P_y，P_z：

$$P_x = \frac{\partial K}{\partial \dot{x}} = M\dot{x}，\ P_y = \frac{\partial K}{\partial \dot{y}} = M\dot{y}，\ P_z = \frac{\partial K}{\partial \dot{z}} = M\dot{z}$$

转动动量 P_ψ，P_ϕ，P_θ：

$$P_\psi = \frac{\partial K}{\partial \dot{\psi}} = I_{xx}\omega_x S_\theta S_\phi + I_{yy}\omega_y S_\theta S_\phi + I_{zz}\omega_z C_\theta$$

$$P_\phi = \frac{\partial K}{\partial \dot{\phi}} = I_{zz}\omega_z$$

$$P_\theta = \frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}} = I_{xx}\omega_x C_\phi - I_{yy}\omega_y S_\phi$$

式中，S、C 分别代表正、余弦函数；ψ、ϕ、θ 为欧拉角。

（3）笛卡儿广义坐标。ADAMS 采用 6 个笛卡儿广义坐标描述一个刚体的位形，利用其质心的 3 个直角坐标 x、y、z 确定位置，连体基的 3 个欧拉角 ψ、ϕ、θ 确定方位，这 6 个量称为笛卡儿广义坐标，可以完全描述系统内各个刚体的位形。

2．ADAMS 软件的多刚体方程

ADAMS 根据机械系统的模型，自动建立系统的拉格朗日运动方程，对于每个刚体，列出对应于 6 个广义坐标带乘子的拉格朗日方程及相应的约束方程：

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\dfrac{\partial K}{\partial \dot{q}_j}\right)-\dfrac{\partial K}{\partial q_j}+\sum\limits_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}\dfrac{\partial \Phi_i}{\partial q_j}\lambda_i=F_i \\ \Phi_i=0 \end{cases} \tag{1-54}$$

式中，$i=1,\cdots,n$，$j=1,\cdots,m$；q_j 为描述系统的广义坐标；Φ_i 为系统的约束方程；F_j 为广义坐标方向上的广义力；λ_i 为拉氏乘子。

上式可写作如下形式：

$$\begin{Bmatrix} F \\ \Phi \end{Bmatrix}=\{0\} \tag{1-55}$$

式中，$F=f\left(\ddot{q},\dot{q},q,\lambda,t\right)$；$\Phi=f\left(\ddot{q},\dot{q},t\right)$。

动能的定义为：

$$K=\frac{1}{2}\dot{r}^{\mathrm{T}}m\dot{r}+\frac{1}{2}\omega^{\mathrm{T}}m\omega$$

代入式（1-55），合并成简洁的矩阵形式为：

$$M\ddot{x}=\Phi_x{}^{\mathrm{T}}\lambda=Q^* \tag{1-56}$$

式中，$\ddot{x}=\left[\ddot{x}_1 \quad \ddot{x}_2 \quad \cdots \quad \ddot{x}_n\right]$；$\Phi_x=\left[\Phi_{x1} \quad \Phi_{x2} \quad \cdots \quad \Phi_{xn}\right]$；$M=diag\ \left[M_1 \quad M_2 \quad \cdots \quad M_n\right]$；$Q^*=\left[Q_1{}^{*\mathrm{T}} \quad Q_2{}^{*\mathrm{T}} \quad \cdots \quad Q_n{}^{*\mathrm{T}}\right]$。

对上述代数—微分方程，ADAMS 将二阶微分方程降阶为一阶微分方程来求解。即 ADAMS 将所有拉格朗日方程均写成一阶微分方程形式，并引入 $u=\dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$，得到

$$\begin{Bmatrix} F \\ \dot{q}-u \\ \Phi \end{Bmatrix}=\{0\} \tag{1-57}$$

式中，$F=f\left(\dot{u},u,q,\lambda,t\right)$。

综上所述，对多刚体系统 ADAMS 将列出以下方程：

（1）刚体运动方程。

6 个一阶动力学方程（力和加速度关系）：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial K}{\partial u_j}\right)-\frac{\partial K}{\partial q_j}+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial \Phi_i}{\partial q_j}\lambda_i=F_i\text{，}\quad q=\left(x,y,z,\psi,\phi,\theta\right)$$

6 个一阶运动学方程（位置和速度关系）：

$$\dot{x}-V_x=0$$
$$\vdots$$
$$\dot{\psi}-\omega_{\psi}=0$$
$$\vdots$$

3 个转动动量的定义方程：

$$P_{\psi}=\frac{\partial K}{\partial \dot{\psi}}=I_{xx}\omega_x S_{\theta}S_{\phi}+I_{yy}\omega_y S_{\theta}S_{\phi}+I_{zz}\omega_z C_{\theta}$$
$$P_{\phi}=\frac{\partial K}{\partial \dot{\phi}}=I_{zz}\omega_z$$
$$P_{\theta}=\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}}=I_{xx}\omega_x C_{\phi}-I_{yy}\omega_y S_{\phi}$$

（2）约束代数方程。

（3）外力的定义方程（重力除外）。

（4）自定义的代数—微分方程。

写成矩阵形式如下：

刚体运动方程 $M\left(\dot{u},u,q,\lambda,f,t\right)=0$

系统约束方程 $\Phi(\dot{q},q,t)=0$

系统外力方程 $F\left(\dot{u},u,q,f,t\right)=0$

自定义代数—微分方程 $\mathrm{DIFF}(\dot{u},u,q,f,t)=0$

式中，q 为笛卡儿广义坐标；u 为广义坐标的微分；f 由外力和约束力组成；t 为时间。

令 $y=\begin{Bmatrix}q\\ \dot{q}\end{Bmatrix}$ 为状态向量，系统方程可写为：

$$G\left(y,\dot{y},t\right)=0 \tag{1-58}$$

1.4.2　ADAMS 的方程求解方案

运动学、静力学分析需求解一系列的非线性代数方程，ADAMS 采用修正 Newton-Raphson 迭代算法迅速准确地求解。对动力学微分方程，根据机械系统的特性，可选择不同的积分算法。对刚性系统，采用变系数 BDF（Backwards Differentiation Formula）刚性积分程序，它是自动变阶、变步长的预估矫正法，在积分的每一步采用了修正的 Newton- Raphson 迭代算法；对高频系统，采用坐标分配法和 ABAM（Adams-Bashforth

-Adams- Moulton）方法。与之相应，ADAMS/Solver 中包含了 3 个功能强大的求解器：

ODE 求解器（求解微分方程），采用刚性或非刚性积分算法；非线性求解器（求解代数方程），采用 Newton-Raphson 迭代算法；线性求解器（求解线性方程组），采用高斯消元法，并引入稀疏矩阵技术。其求解过程如图 1-3 所示。

ADAMS/Solver 有 5 个强大的数值积分程序，其中 4 个为变阶、变步长的刚性积分程序（GSTIFF，SI2_GSTIFF，DSTIFF，WSTIFF），使用最多的是变系数的 BDF（Backwards Differentiation Formula）方法，它是自动变阶、变步长的预估矫正法。第五个为非刚性积分程序，采用了 Adams-Bashforth-Adams-Moulton 算法，对于常用的 4 个 BDF 积分程序，其预估矫正求解过程分 3 个阶段实现：

（1）预估阶段。

① 根据泰勒展开式预估在 t_{n+1} 时刻 y 及 $\dot{y}$ 的值：

$$y_{n+1} = y_n + hy^{(1)}{}_n + \frac{h^2}{2} y^{(2)}{}_n + \cdots + \frac{h^k}{k!} y_n{}^{(k)} \tag{1-59}$$

式中，$h = t_{n+1} - t_n$ 为步长。

对于 Gear Stiff 积分程序的格式为：

$$y_{n+1} = \sum_{i=1}^{k} \alpha_i y_{n-i+1} - h\beta_0 \dot{y}_{n+1} \tag{1-60}$$

式中，β_0, α_i 为 Gear 积分系数。

$$\dot{y}_{n+1} = \frac{1}{h\beta_0}\left(\sum_{i=1}^{k} \alpha_i y_{n-i+1} - y_{n+1}\right) \tag{1-61}$$

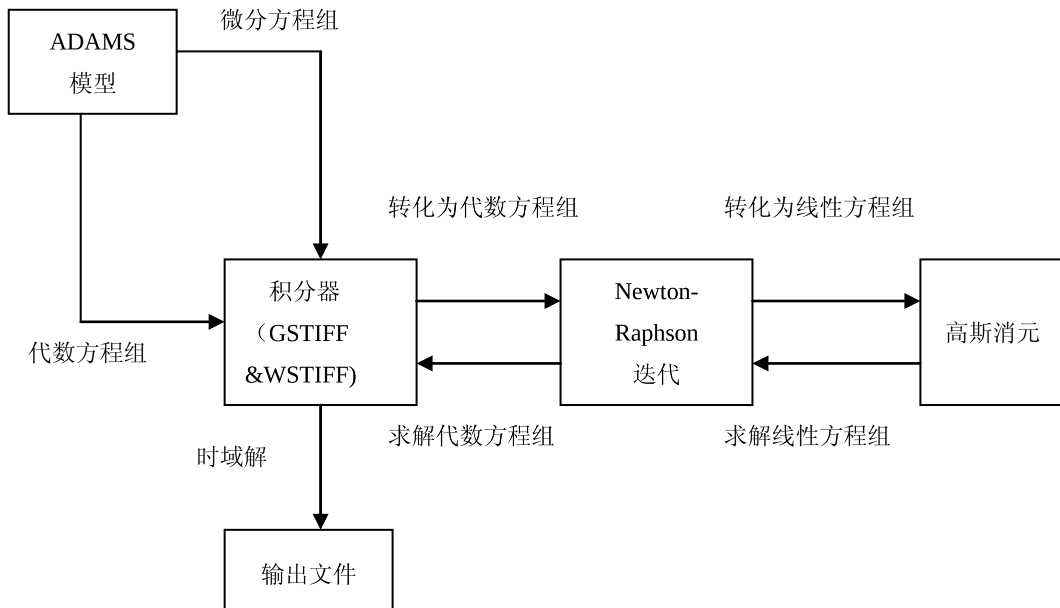


图 1-3 ADAMS 求解过程

（2）校正阶段。

② 求解系统方程 G，如 $G(y,\dot{y},t)=0$，则方程成立，此时 y 为方程解，否则继续。

③ 求解 Newton-Raphson 线性方程得到 Δy，以更新 y，使系统方程 G 更近于成立。

$$J\Delta y = G(y,\dot{y},t_{n+1}) \tag{1-62}$$

式中，J 为系统雅可比矩阵。

④ 利用 Newton-Raphson 迭代，更新 y

$$y_{k+1} = y_k + \Delta y_k \tag{1-63}$$

⑤ 重复步骤 ②～④ 直到 Δy 足够小。

（3）误差控制阶段。

⑥ 预估积分误差并与误差精度比较，如误差过大则摒弃此步。

⑦ 计算优化的步长 h 和阶数 k。

⑧ 如时间已到结束时间，则停止仿真，否则 $t=t+\Delta t$ 进入步骤 1。其积分程序的程序逻辑如图 1-4 所示。

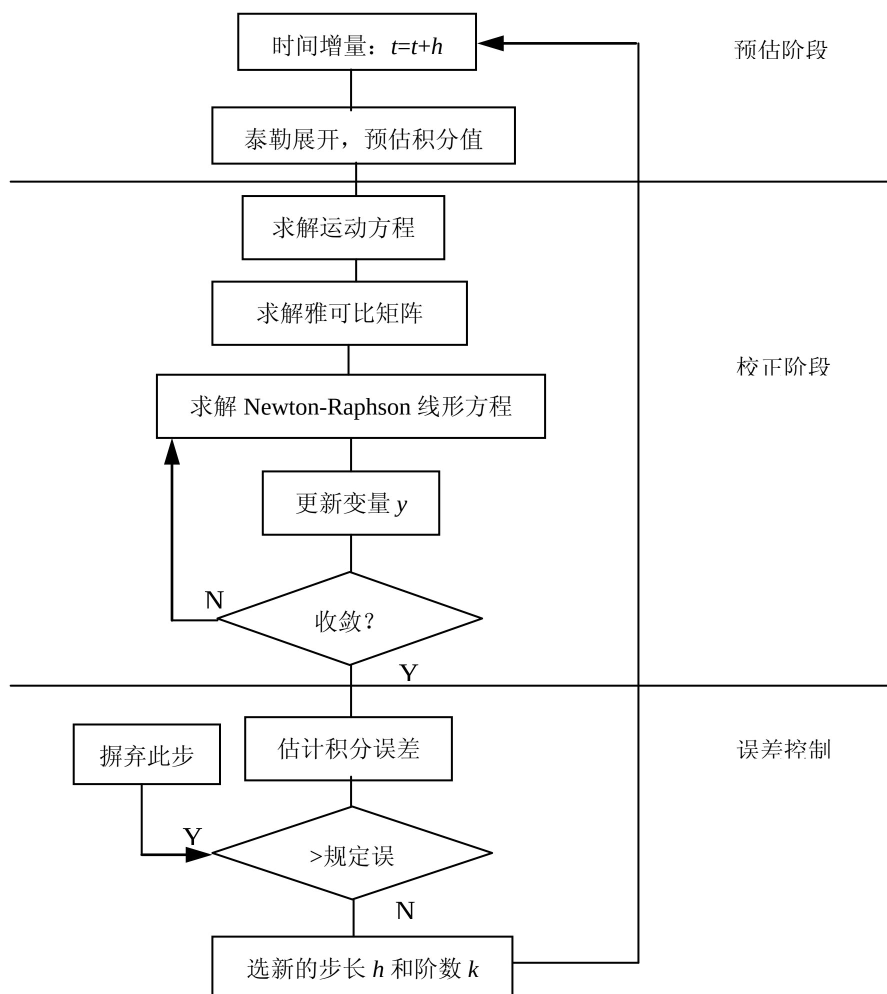


图 1-4　积分程序逻辑

3 种 STIFF 刚性积分程序中 WSTIFF 稳定性最好，但计算效率不高；GSTIFF 计算效率最高，但稳定性最差；DSTIFF 的计算效率和稳定性则介于两者之间，这 3 种积分程序适用于模拟刚性机械系统，而 ABAM 积分程序适用于模拟经历突变的系统或高频系统。ADAMS 缺省的积分程序为 GSTIFF，以提高计算效率，但较容易出现数值发散现象。

1.4.3 ADAMS 采用的碰撞模型

碰撞是常见的一种力学现象。特点是在极短的时间（万分之几到千分之几秒）内，使物体的速度发生突然变化，同时产生巨大的碰撞力（或称瞬时力）。

多刚体系统的碰撞动力学是实际工程技术中一个重要的研究课题和方向。带拖车车辆或列车与人或其他障碍物的碰撞、车辆驾驶员在车辆碰撞时的响应、航天器入轨后太阳帆板展开到位时与定位销的碰撞、跳伞运动员的落地、拳击运动员的受击、体操运动员的落地、武器发射系统所受脉冲动力学响应等均可归结多刚体碰撞动力学问题。

碰撞过程可以认为是一个变结构的动力学问题。碰撞发生前后的系统与碰撞阶段是两种拓扑结构状态。两种状态切换的问题与变结构问题相同，可用识别方程的实施来解决，但碰撞问题又有特殊性，即需解决碰撞阶段的动力学模型。对碰撞接触过程的描述目前主要有两种：经典碰撞模型和接触变形模型。

1．经典碰撞模型

在系统运动过程中碰撞体间的相对运动关系存在“分离—碰撞—接触”3 种状态。处于分离状态时几何接触约束不起作用，系统动力学方程可表达为

$$\begin{cases} M\ddot{q}+Kq+\Phi_q{}^{\mathrm{T}}\lambda=Q \\ \Phi(q,t)=0 \end{cases} \tag{1-64}$$

式中，M、K、Φ_q 和 Q 分别为多体系统的广义质量阵、刚度阵、约束方程的雅可比阵和广义速度二次项及广义力列阵。

对于接触状态，运动方程中含有几何约束 $\Phi^a=0$，系统动力学方程为

$$\begin{cases} M\ddot{q}+Kq+\Phi_q{}^{\mathrm{T}}\lambda+\Phi_q^{a\mathrm{T}}\lambda^a=Q \\ \Phi(q,t)=0 \\ \Phi^a(q,t)=0 \end{cases} \tag{1-65}$$

在碰撞时，采用动量转换原理和恢复系数确定碰撞后的状态，假定碰撞过程极短，$\Delta t=t^+-t^-\to 0$，两体碰撞时是刚性的，且碰撞前后的机构位形不变。代之以动量方程，可推得系统动力学方程为

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q{}^{\mathrm{T}} & H^{\mathrm{T}} \\ \Phi_q & 0 & 0 \\ H & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\dot{q} \\ P^{\lambda} \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Psi \end{Bmatrix} \tag{1-66}$$

式中，$\Delta\dot{q}$ 为广义速度矢量得增量；P 和 P^{λ} 分别为广义力和约束反力的广义冲量；

$\Psi = -(1+e)H\dot{q}$；$H = \partial S/\partial q$；$S$为两碰撞点间的距离；$F(t)$为碰撞时的冲击力；$e$为碰撞恢复系数。

对碰撞时的动力学方程求解，可求得广义速度增量和碰撞冲量，从而可获得碰撞后的初始状态。该模型的优点是描述形象直观，缺点是不能给出碰撞时间，无法计算出碰撞时的冲击力，只能用冲量衡量冲击造成的严重程度，建模和计算都比较复杂。

2．接触碰撞模型

接触碰撞模型将碰撞过程归结为“自由运动—接触变形”两种状态，它通过计入碰撞体接触表面的弹性和阻尼，建立了描述碰撞过程中力和接触变形之间的本构关系。目前，这种间隙模型有 3 种类型：基于 Dubowsky 线形化的碰撞铰模型、基于 Hertz 接触理论的 Herts 接触模型和基于非线形等效弹簧阻尼模型。其中非线性等效弹簧阻尼模型的广义形式可表示为：

$$F = K\delta^{e} + C_1\dot{\delta} + C_2\dot{\delta}\delta \tag{1-67}$$

式中，F为法向接触力；K为 Hertz 接触刚度；C_1、C_2为阻尼因子；δ为接触点法向穿透距离；e为不小于 1 的指数。

通过对 K、C_1、C_2的取值，可得到不同类型的间隙模型。

在自由运行阶段，系统动力学方程与经典模型中分离阶段相同。在接触碰撞阶段，两碰撞体由自由运动状态到接触变形，产生了约束条件的变化，解除系统的运动学约束，代之以约束力。在碰撞物体间引入等效弹簧阻尼模型，则系统运动学方程为

$$\begin{cases} M\ddot{q} + Kq + \Phi_q{}^{T}\lambda = Q + F_I \\ \Phi(q,t) = 0 \end{cases} \tag{1-68}$$

式中，F_I为接触力F相对于广义坐标q的广义力阵列。

采用接触变形模型建立的动力学方程，系统自由度与碰撞副状态无关，从这点看，这种方法是将变拓扑结构系统动力学问题转换为无拓扑结构变化的系统动力学问题处理，但由于系统的接触力为时变的，需判断其接触分离的切换点。与经典模型相比，该模型建模过程简单，可描述碰撞过程中的冲击力，易于实现对系统运动过程的全局仿真。

在 ADAMS 中常采用的模型为

$$F = K\delta^{e} + C(\delta)\dot{\delta} \tag{1-69}$$

在 ADAMS 中还可通过静摩擦因数和动摩擦因数引入摩擦力，这样法向碰撞力和摩擦力就构成了碰撞副中总的相互作用力。

第 2 章

ADAMS 模块介绍

ADAMS（Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems）是美国 MSC 公司开发的机械系统动力学自动分析软件。ADAMS 软件由基本模块、扩展模块、接口模块、专业领域模块及工具箱 5 类模块组成，用户不仅可以采用通用模块对一般的机械系统进行仿真，还可以采用专用模块针对特定领域的问题进行快速有效的建模与仿真分析。

学习要点

- ADAMS 基本模块
- ADAMS 扩展模块
- ADAMS 接口模块
- ADAMS 专业领域模块

2.1 虚拟样机技术

虚拟样机技术是指在产品设计开发过程中，将分散的零部件设计和分析技术融合在一起，在计算机上建造出产品的整体模型，并针对该产品在投入使用后的各种工况进行仿真分析，预测产品的整体性能，进而改进产品设计、提高产品性能的一种新技术。虚拟样机技术源于对多体系统动力学的研究。尽管它的核心是机械系统运动学、动力学和控制理论，但没有成熟的三维计算机图形技术和基于图形的用户界面技术，虚拟样机技术也不会成熟。虚拟样机技术在技术与市场两个方面的成熟也与 3C 技术的成熟及大规模推广应用分不开。首先，CAD 中的三维几何造型技术能够使设计师们的精力集中在创造性设计上，把绘图等繁琐的工作交给计算机去做。这样设计师就有额外的精力关注设计的正确和优化问题。其次，三维造型技术使虚拟样机技术中的机械系统描述问题变得简单。第三，由于 3C 强大的三维几何编辑修改技术，使机械系统设计的快速修改变为可能。在此基础上，基于计算机的设计、试验、设计的反复过程才有时间上的意义。

虚拟样机技术在工程中的应用是通过界面友好、功能强大、性能稳定的商品化虚拟样机软件实现的。国外虚拟样机技术软件的商品化过程早已完成。

虚拟制造技术（Virtual Manufacturing Technology，VMT）首先在飞机、汽车等领域获得成功的应用。飞机制造业对虚拟样机的需求最为迫切，因为飞机成本非常高，系统复杂，因此不可能制造多台物理样机或多台飞机子系统物理样机。此外飞机实地试验耗资巨大，危险系数高，且受到安全法规的严格限制，还必须满足产品安全性、性能和可靠性的标准。

目前虚拟样机技术除了应用到飞机、汽车制造业外已经广泛地应用到工程机械、航天航空业、国防工业及通用机械制造业等领城，所涉及的产品从庞大的卡车到照相机的快门，从上天的火箭到远洋轮船的锚链。在各个领域里，针对各种产品，虚拟样机技术都为用户节省了开支和时间，并通过仿真分析、试验设计、改进优化等最终给用户提供了满意的设计方案。

制造领域中虚拟样机技术在下面几个方面的作用尤为明显：

（1）产品的外形设计。以前，汽车外形造型设计多采用泡沫塑料制作外形模型，通过多次修改完成，既费工又费时，最终的结果也未必使人满意。采用虚拟技术的外形设计，可随时修改、评价，确定后方案的建模数据可直接用于设计、仿真和加工，甚至用于广告和宣传。

（2）产品装配仿真。机械产品的配合性和可装配性是设计人员容易出现错误的地方，以往要到产品最后装配时才能发现，导致零件的报废和工期的延误，从而造成巨大的经济损失。采用虚拟装配技术可以在设计阶段就进行验证，确保设计的正确性，避免损失。

（3）产品的运动和动力学仿真。运用虚拟样机技术在产品设计阶段就能展示出产品的行为、动态的表现以及产品的性能。在产品设计阶段解决运动构件工作时的运动协调关系、运动范围、可能的运动干涉检查、产品动力学性能、强度、刚度等问题。

（4）虚拟样机与产品工作性能评测。首先进行产品的立体建模，然后将这个模型置于虚拟环境中控制、仿真和分析，可以在设计阶段就对设计的方案、结构等进行仿真，解决大多数问题，提高一次试验成功率。采用虚拟现实技术，还可以方便、直观地进行工作性能检查。

虚拟样机技术的核心部分是多体系统运动学与动力学建模理论及其技术实现，而计算机可视化技术及动画技术的发展为这项技术提供了友好的用户界面。

2.2 多学科分析技术

多学科（MD）技术为用户提供了能够满足需求的缩小测试与仿真差距的技术，真正实现了多学科仿真，所建立的公共平台大大缩短了传统的单学科间数据传递的时间。

在工程实践中，单个解决方案允许多学科分析，但不能考虑多学科之间的交互作用和耦合。只有对关键学科之间复杂交互作用的准确表述才能保证真实地模拟物理现象。即使借用目前的前后处理器、计算力量和自动运行能力，单个学科专家仍然要通过许多离散的分析步骤来手工模拟仿真学科之间的复杂交互作用。对于某一学科的多步分析，相当耗费时间。另外，通过处理大量的分析数据来确定如何将结果从一个学科传递到另外一个学科，工程师有时手工传递计算信息，或者将运动信息作为静态施加到对系统进行的有限元分析中，往往会带来人为的错误、降低模拟精度，而且这个过程也没有可重复性。

多学科（MD）技术将它们连接在一起，使数据变得动态实时，也就是它们放在一个开放的循环环境中。无论是线性、非线性、运动、CFD 还是显式非线性动力学，多学科（MD）技术允许多学科集成仿真，而不是仅仅简单地相互之间连接。这意味着相互之间在极其适当的时候提供正确的工程和力学反馈，有别于传统的多物理系统。

在多体运动和有限元分析之间的多学科集成，有助于多学科模拟仿真在企业产品的早期就进行指导设计，有限元分析和 CFD 之间的集成，也是同样的方式。例如，ADAMS 分析汽车在颠簸路面上如何引起噪声和车辆的振动，MD Nastran 能够把 ADAMS 的模型以数学表述的形式和 Nastran 的 NVH 模型完全集成到一起，工程师使用一个模型仿真车内的噪声，同时集成到真实的颠簸路况的 NVH 研究中，而 NVH 仿真生成的载荷又为后续的碰撞分析所用。在另外一个多学科耦合的例子中，汽车工程师在运行 ADAMS 分析悬架系统的同时，可以把悬架的数据作为有限元分析模型的一部分，通过 Nastran 评估部件的寿命。

相比将多个独立的仿真工具捆绑在一起分析的方法，多学科（MD）技术使用户可以用一个模型完成仿真。需要说明的是，这并不意味着所有的学科都用完全一样的模型，而是从一个模型中提取出共同的载荷和约束来做系统级仿真。同时，一个方程也不能解决所有的仿真问题，因此需要一系列的方程来表述一个模型才可能给出非常切合实际的方程结果。用户可以在仿真分析的任何层面上进行优化，拓扑和形状优化应用于不同的学科，概率优化用于确定设计的稳定性，工程师可以解算系统方程并在所有的层面上确定制造过程带来的大量不确定因素的影响。

如果考虑到产品的寿命问题，工程师在制造之前就要仿真整个产品系统。即使先不考虑多学科的集成，模型的大小和复杂程度显然也是惊人的。如果考虑学科之间的交叉，尤其考虑到优化分析，计算资源就要承受严峻的考验，这在前些年极大地制约了系统仿真的效率和准确度。现在来看，随着计算机运算性能的大幅度提高，利用极其庞大的模型数据来分析越来越复杂的仿真模型已经成为可能。多学科（MD）技术是跨学科的优化和集成，其价值在于大大拓展了数字分析的能力，可以充分利用现有的高性能计算技术解决大量大规模的问题。

多学科仿真功能允许制造行业的用户可以准确分析一系列的多学科耦合问题，对产品的性能有一个准确的预测，使得用户距离将来的虚拟产品开发环境更进一步。多学科（MD）技术聚焦于提升仿真效率，保证初期设计的有效性，提升品质并加快产品投放市场的速度。由于生产商需要对开发的部件和装配体进行多学科的细致分析以继续满足客户的高需求，全球领先的虚拟产品开发技术供应商 MSC.Software 历经数载潜心开发，终于推出了业界期待已久的多学科联合仿真引擎 MD 系列软件，为相关领域的企业提供了最好的大规模仿真平台。

2.3 ADAMS 软件基本模块

2.3.1 ADAMS/View（用户界面模块）

ADAMS/View 是 ADAMS 系列产品的核心模块之一，采用以用户为中心的交互式图形环境，将图标操作、菜单操作、鼠标拾取操作与交互式图形建模、仿真计算、动画显示、优化设计、X-Y 曲线图处理、结果分析、数据打印等功能集成在一起。

ADAMS/View 采用简单的分层方式完成建模工作。采用 Parasolid 内核进行实体建模，并提供了丰富的零件几何图形库、约束库和力/力矩库，并且支持布尔运算、支持 FORTRAN/77 和 FORTRAN/90 中的函数。除此之外，还提供了丰富的位移函数、速度函数、加速度函数、接触函数、样条函数、力/力矩函数、合力/力矩函数、数据元函数、若干用户子程序函数、常量、变量等。

自 2.0 版本后，ADAMS/View 采用了用户熟悉的 Motif 界面（UNIX 系统）和 Windows 界面（NT 系统），从而大大提高了快速建模能力。在 ADAMS/View 中，用户利用 TABLE EDITOR，可以像用 EXCEL 一样方便地编辑模型数据，同时还提供了 PLOT BROWSER 和 FUNCTION BUILDER 工具包。DS（设计研究）、DOE（实验设计）及 OPTIMIZE（优化）功能可使用户方便地进行优化工作。ADAMS/View 有自己的高级编程语言，支持命令行输入命令和 C++语言，有丰富的宏命令及方便快捷的图标按钮、菜单、对话框和修改工具包，还具有在线帮助功能。最新的 Adams 2012 采用了全新的用户界面但还保留了经典的模式，ADAMS/View 模块界面如图 2-1 所示。

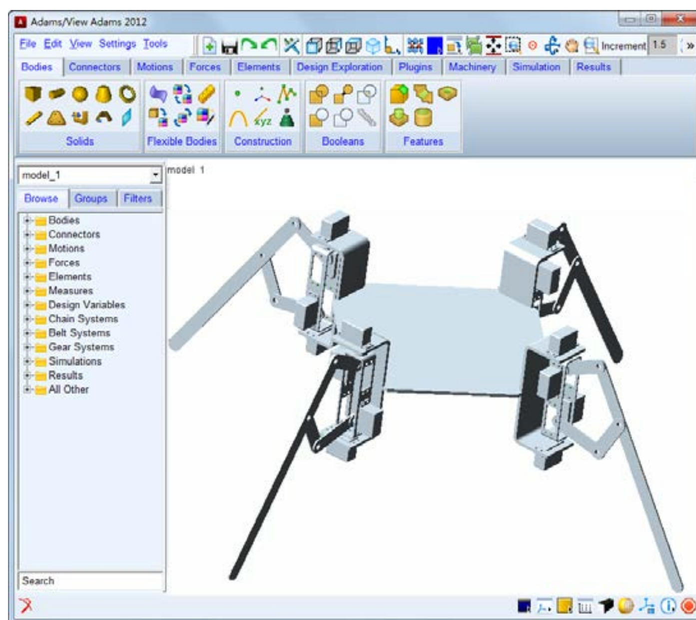


图 2-1　ADAMS/View 模块界面

ADAMS/View 2012 采用了改进的动画/曲线图窗口，能够在同一窗口内同步显示模型的动画和曲线图，具有丰富的二维碰撞副，用户可以对具有摩擦的二维点-曲线、圆-曲线、平面-曲线、曲线-曲线、实体-实体等碰撞副自动定义接触力；具有实用的 Parasolid 输入/输出功能，可以输入 CAD 中生成的 Parasolid 文件，也可以把单个构件、整个模型，或者在某一指定仿真时刻的模型输出到一个 Parasolid 文件中；具有新型数据库图形显示功能，能够在同一图形窗口内显示模型的拓扑结构，选择某一构件或约束（运动副或力）后显示与此项相关的全部数据；具有快速绘图功能，绘图速度是原版本的 20 倍以上；采用合理的数据库导向器，可以在一次作业中利用一个名称过滤器修改同一名称中多个对象的属性，便于修改某一个数据库对象的名称及说明内容；具有精确的几何定位功能，可以在创建模型的过程中输入对象的坐标、精确地控制对象的位置。它在多种平台上采用统一的用户界面、提供合理的软件文档，支持 Intel Windows NT 平台的快速图形加速

卡，确保用户可以利用高性能 OpenGL 图形卡提高软件的性能，命令行可以自动记录各种操作命令，进行自动检查。

2.3.2 ADAMS/Solver（求解器模块）

ADAMS/Solver 是 ADAMS 系列产品的核心模块之一，是 ADAMS 产品系列中处于心脏地位的仿真器。该软件自动形成机械系统模型的动力学方程，提供静力学、运动学和动力学的解算结果。ADAMS/Solver 有各种建模和求解选项，以便精确有效地解决各种工程应用问题。

ADAMS/Solver 可以对刚体和弹性体进行仿真研究。为了进行有限元分析和控制系统研究，用户除要求软件输出位移、速度、加速度和力外，还可要求模块输出用户自己定义的数据。用户可以通过运动副、运动激励，高副接触、用户定义的子程序等添加不同的约束，同时可求解运动副之间的作用力和反作用力，或者施加单点外力。

ADAMS/Solver 2012 中对校正功能进行了改进，使得积分器能够根据模型的复杂程度自动调整参数，仿真计算速度提高了 30%；采用新的 SI2 型积分器（Stabilized Index 2 intergrator），能够同时求解运动方程组的位移和速度，显著增强了积分器的鲁棒性，提高了复杂系统的解算速度。采用适用于柔性单元（梁、衬套、力场、弹簧-阻尼器）的新算法，可提高 SI2 型积分器的求解精度和鲁棒性；可以将样条数据存储成独立文件使之管理更方便，并且 spline 语句适用于各种样条数据文件，样条数据文件子程序还支持用户定义的数据格式；具有丰富的约束摩擦特性功能，在 Translational、Revolute、Hooks、Cylindrical、Spherical、Universal 等约束中可定义各种摩擦特性。

ADAMS/View 的运行函数能够表明定义系统行为的仿真状态之间的数学关系。在 ADAMS/View 中将这些运行函数与其他不同元素一同创建各种系统变量，这些函数大多数都以施加力和产生运动为目的。在仿真中进行解算时，ADAMS/Solver 会用到变量函数并进行计算更新，在仿真过程中这些系统状态会发生改变，如随时间的改变而改变、随零件的移动而改变、施加的力以不同方式改变等。ADAMS/View 和 ADAMS/Solver 用到的函数见附录 A。

2.3.3 ADAMS/PostProcessor（后处理模块）

ADAMS/PostProcessor 是 ADAMS 软件的后处理模块，绘制曲线和仿真动画的功能十分强大，既可以在 ADAMS/View 环境中运行，也可脱离环境独立运行，如图 2-2 所示。

利用 ADAMS/PostProcessor 可以使用户更清晰地观察其他 ADAMS 模块（如 ADAMS/View、ADAMS/Car 或 ADAMS/Engine）的仿真结果，也可将所得到的结果转化为动画、表格、HTML 等形式，能够更确切地反映模型的特性，便于用户对仿真计算的结果进行观察

和分析。ADAMS/PostProcessor 在模型的整个设计周期中都发挥着重要的作用，其用途有以下 4 个方面。

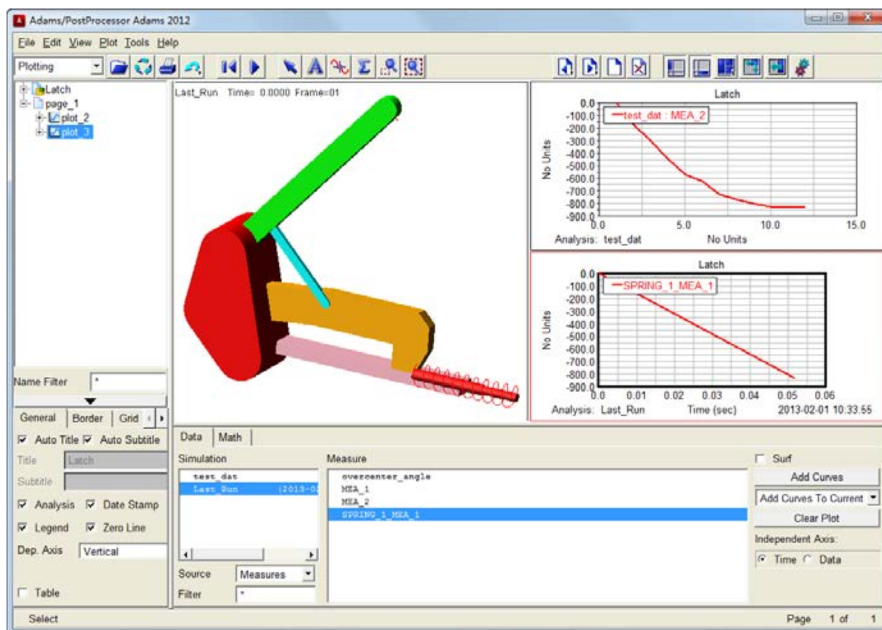


图 2-2　ADAMS/PostProcessor 模块

1．模型调试

在 ADAMS/PostProcessor 中，用户可选择最佳的观察视角来观察模型的运动，也可向前、向后播放动画，有助于对模型进行调试。也可从模型中分离出单独的柔性部件，以确定模型的变形。

2．试验验证

如果需要验证模型的有效性，可输入测试数据并以坐标曲线图的形式表达出来，然后将其与 ADAMS 仿真结果绘于同一坐标曲线图中进行对比，并可以在曲线图上进行数学操作和统计分析。

3．设计方案改进

在 ADAMS/PostProcessor 中，可在图表上比较两种以上的仿真结果，从中选出合理的设计方案。另外，通过单击鼠标，可更新绘图结果。如果要加速仿真结果的可视化过程，可对模型进行多种变化，也可以进行干涉检验，并生成一份关于每帧动画中构件之间最短距离的报告，帮助改进设计。

4．结果显示

ADAMS/PostProcessor 可显示运用 ADMAS 进行仿真计算和分析研究的结果。为增强结果图形的可读性，可以改变坐标曲线图的表达方式，或者在图中增加标题和附注，或

者以图表的形式来表达结果。为增加动画的逼真性，可将 CAD 几何模型输入到动画中，也可将动画制作成小电影的形式，最终可在曲线图的基础上得到与之同步的三维几何仿真动画。

ADAMS/PostProcessor 的主要特点是采用快速、高质量的动画显示，便于从可视化角度深入理解设计方案的有效性；使用树状搜索结构，层次清晰，可快速检索对象；具有丰富的数据作图、数据处理及文件输出功能；具有灵活多变的窗口风格，支持多窗口画面分割显示及多页面存储；多视窗动画与曲线结果同步显示，并可录制成电影文件；具有完备的曲线数据统计功能，得到均值、均方根、极值、斜率等结果；具有丰富的数据处理功能，能够进行曲线的代数运算、反向、偏置、缩放、编辑、生成波特图等；为光滑消隐的柔体动画提供了更优的内存管理模式；强化了曲线编辑工具栏功能；能支持模态形状动画，模态形状动画可记录的标准图形文件格式有*.gif、*.jpg、*.bmp、*.xpm、*.avi 等；在日期、分析名称、页数等方面增加了图表动画功能；可进行几何属性细节的动态演示。

2.3.4　ADAMS/Insight（试验设计与分析模块）

ADAMS/Insight 是基于网页技术的新模块，利用该模块可以方便地将仿真试验结果置于 Intranet 或 Extranet 网页上，以使企业不同部门的人员（设计工程师、试验工程师、计划/采购/管理/销售部门人员）都可以共享分析成果，加速决策进程，最大限度地减少决策的风险。

ADAMS/Insight 提供了对试验结果进行各种专业化统计分析的工具，工程师利用它可以规划和完成一系列仿真试验，从而精确地预测所设计的复杂机械系统在各种工作条件下的性能。ADAMS/Insight 是选装模块，既可以在 ADAMS/View、ADAMS/Car、ADAMS/Pre 环境中运行，也可脱离 ADAMS 环境单独运行，如图 2-3 所示。工程师在拥有这些工具后，就可以对任何一种仿真进行试验方案设计，精确地预测设计产品的性能，得到高品质的设计方案。

ADAMS/Insight 采用的试验设计方法包括全参数法、部分参数法、对角线法、Box-Behnkn 法，Placket-Bruman 法和 D-Optimal 法等。当采用其他软件设计机械系统时，工程师可以直接输入或通过文件输入系统矩阵对设计方案进行试验设计；可以通过扫描识别影响系统性能的灵敏参数或参数组合;可以采用响应面法(Response Surface Methods)对试验数据进行数学回归分析，帮助工程师更好地理解产品的性能和系统内部各个零部件之间的相互作用。试验结果采用工程单位制，可以方便地输入其他试验结果进行工程分析。通过网页技术可以将仿真试验结果通过网页进行交流，便于企业各个部门评价和调整机械系统的性能。

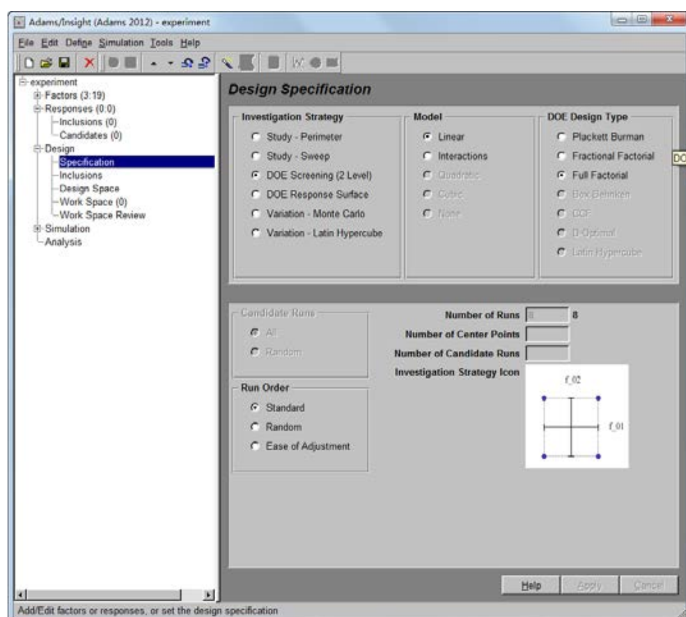


图 2-3　ADAMS/Insight 模块

ADAMS/Insight 能帮助工程师更好地了解产品的性能，能有效地区分关键参数和非关键参数；能根据客户的不同要求提出各种设计方案，以便清晰地观察对产品性能的影响；在产品制造之前，可综合考虑各种制造因素的影响（例如公差、装配误差、加工精度等），以提高产品的实用性；能加深对产品技术要求的理解，强化企业各部门之间的合作。应用 ADAMS/Insight，工程师可以将许多不同的设计要求有机地集成为一体，提出最佳的设计方案，并保证试验分析结果具有足够的工程精度。

2.4 ADAMS 软件扩展模块

2.4.1　ADAMS/Controls（控制模块）

ADAMS/Controls 是 ADAMS 软件包中的一个集成可选模块。在 ADAMS/Controls 中，工程师既可以通过简单的继电器、逻辑与非门、阻尼线圈等创建简单的控制机构，也可利用通用控制系统软件（如 MATLAB、MATRIX、EASY5）建立的控制系统框图，创建包括控制系统、液压系统、气动系统和运动机械系统的仿真模型。

在仿真计算过程中，ADAMS 采取以下两种工作方式。

（1）机械系统采用 ADAMS 解算器，控制系统采用控制软件解算器，二者通过状态方程进行联系。

（2）利用控制软件书写描述控制系统的控制框图，然后将该控制框图提交给 ADAMS，应用 ADAMS 解算器，进行包括控制系统在内的复杂机械系统虚拟样机的同步仿真计算。

这样的机械控制系统的联合仿真分析过程可以用于许多领域，例如汽车自动防抱死系统（ABS）、主动悬架、起落架助动器、卫星姿态控制等。联合仿真计算可以是线性的，也可以是非线性的。使用 ADAMS/Controls 的前提是需要 ADAMS 与控制系统软件同时安装在相同的工作平台上，其设置面板如图 2-4 所示。

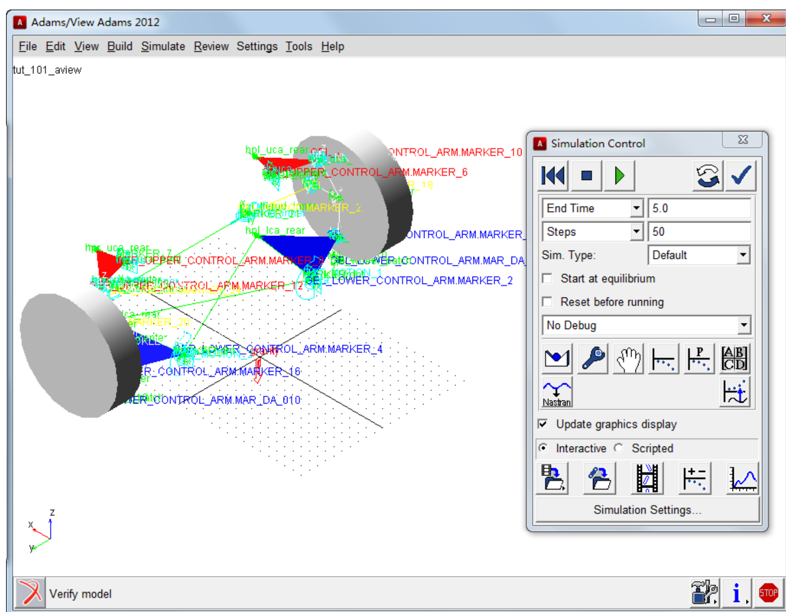


图 2-4　Simulation Control 面板

2.4.2　ADAMS/Vibration（振动分析模块）

ADAMS/Vibration 是进行频域分析的工具，可用来检测 ADAMS 模型的受迫振动，如检测汽车虚拟样机在颠簸不平的道路上行驶时的动态响应。所有输入输出都将在频域内以振动形式描述，该模块可作为 ADAMS 运动仿真模型从时域向频域转换的桥梁。

通过运用 ADAMS/Vibration 可以实现各种子系统的装配并进行线性振动分析，利用功能强大的后处理模块 ADAMS/PostProcessor 可进一步作出因果分析与设计目标设置分析。

采用 ADAMS/Vibration 模块，可以在模型的不同测试点，进行受迫响应的频域分析。频域分析中可以包含液压、控制、用户系统等结果信息，能够快速准确地将 ADAMS 线性化模型转入 Vibration 模块中；能够为振动分析开辟输入、输出通道，定义频域输入函数，产生用户定义的力频谱；能够求解所关注的频带范围的系统模型，评价频响函数的幅值大小及相位特征；能够动画演示受迫响应及各模态响应；能够把系统模型中有关受

迫振动响应的信息列表；能够把 ADAMS 模型中的状态矩阵输出到 MATLAB 及 MATRIX 中，以便做进一步的分析；能够运用设计研究、试验设计及振动分析结果和参数化的振动输入数值优化系统综合性能。

运用 ADAMS/Vibration 使工作变得快速简单，运用虚拟检测振动设备可方便地替代实际振动研究中复杂的检测过程，从而避免了实际检测只能在设计后期进行而且费用高昂的弊病，缩短了设计时间，降低了设计成本。ADAMS/Vibration 输出的数据还可被用来研究预测汽车、火车、飞机等机动车辆的噪音对驾驶员及乘客的影响，体现了以人为本的现代设计趋势。

2.4.3 ADAMS/Flex（柔性分析模块）

ADAMS/Flex 是 ADAMS 软件包中的一个集成可选模块，提供了与 ANSYS、MSC/NASTRAN、ABAQUS、I-DEAS 等的软件接口，可以方便地考虑零部件的弹性特性，创建多体动力学模型，以提高系统仿真的精度，其模块窗口如图 2-5 所示。ADAMS/Flex 模块支持有限元软件中的 MNF（模态中性文件）格式。结合 ADAMS/Linear 模块，可以对零部件的模态进行适当地筛选，去除对仿真结果影响极小的模态，并可以人为控制各阶模态的阻尼，进而提高仿真的速度。同时，利用 ADAMS/Flex 模块，还可以方便地向有限元软件输出系统仿真后的载荷谱和位移谱信息，利用有限元软件进行应力、应变及疲劳寿命的评估分析和研究。

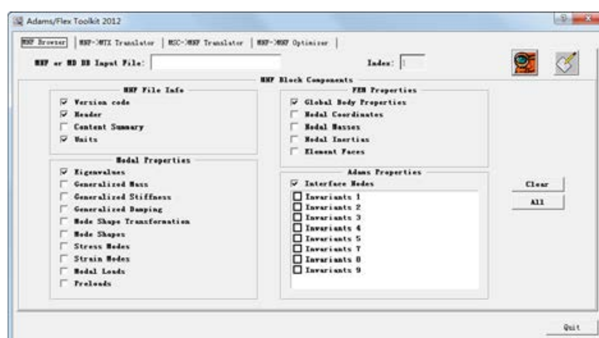


图 2-5　柔性分析模块

2.4.4 ADAMS/Durability（耐久性分析模块）

耐久性试验是产品开发的一个关键步骤，耐久性试验能够解答“机构何时报废或零部件何时失效”这个问题，它对产品零部件性能和整机性能都具有重要影响。MDI 公司已经与 MTS 公司及 nCode 公司合作，共同开发 ADAMS/Durability，使之成为耐久性试验的完整解决方案。

ADAMS/Durability 按工业标准的耐久性文件格式对时间历程数据接口进行了一次全新的扩展。目前，该模块支持两种时间历程文件格式，即 nSoft 和 MTS 的 RPC3。ADAMS/Durability 可以把上述文件格式的数据直接输入到 ADAMS 仿真模块中去，也可以把 ADAMS 的仿真分析结果输出到这种文件格式中来。

ADAMS/Durability 集成了 VTL（Virtual Test Lab）技术，VTL 工具箱是由 MTS 与 MDI 公司设计并创建的标准机械检测系统，通过 MTS 的 RPC 图形，用户接口可实施检测，并保留检测配置及操作问题，VTL 的检测结果将返回工业标准的 RPC 格式文件中。一旦得到实际检测结果，标准分析应用程序便可以执行预测分析及验证。

nCode 公司的 nSoft 耐久性分析软件可以进行应力寿命、局部应变寿命、裂隙扩展状况、多轴向疲劳及热疲劳特征、振动响应、各种焊接机构强度等分析。ADAMS/Durability 把以上技术集成在一起，从而使虚拟样机检测系统耐久性成为现实。

ADAMS/Durability 的主要功能是，可以从 nSoft 的 DAC 及 RPC3 文件中提取时间记载数据，并将其插入 ADAMS 仿真模块中进行分析；可以把 REQUEST 数据存储在 DAC 及 MTS RPC3 文件中，把 ADAMS 仿真结果及测量数据输出到 DAC 及 MTS RPC3 文件中；可以查看 DAC 及 MTS RPC3 文件的信息与数据；可以提取 DAC 及 MTS RPC3 文件中的数据并绘图，以此与 ADAMS 仿真结果相对照。

2.5 ADAMS 软件接口模块

2.5.1 ADAMS/Exchange（图形接口模块）

ADAMS/Exchange 是 ADAMS/View 的一个集成可选模块，其功能是利用 IGES、STEP、STL、DWG/DXF 等产品数据交换库的标准文件格式完成 ADAMS 与其他 CAD/CAM/CAE 软件之间数据的双向传输，从而使 ADAMS 与其他软件更紧密地集成在一起。ADAMS/Exchange 可保证传输精度，节省用户时间，增强仿真能力。当用户将 CAD/CAM/ CAE 软件中创建的模型向 ADAMS 传输时，ADAMS/Exchange 自动将图形文件转换成一组包含外形、标志和曲线的图形要素，通过控制传输时的精度，可获得较为精确的几何形状，并获得质量、质心和转动惯量等重要信息。用户可在其上添加约束、力、运动等，这样就减少了在 ADAMS 中重建零件几何外形的要求，节省建模时间，增强了用户观察虚拟样机仿真模型的能力。

2.5.2 CAT/ADAMS（CATIA 专业接口模块）

为了使 ADAMS 更方便地与 CATIA 进行数据交换，Dassault Systems 公司与美国 MDI 公司在 BMW、Chrysler、Peugeot 等汽车公司的大力支持下开发了 CAT/ADAMS。

应用 CAT/ADAMS 可将 ADAMS 虚拟样机技术有机地融入 CATIA 中，即同时将 CATIA 的运动学模型、几何图形和其他实体信息方便地传递至 ADAMS；可以对整个产品进行动力学分析，并将分析结果反馈给 CATIA；可以进行碰撞检测和间隙影响研究。采用这样的接口可以改进仿真精度、提高工程分析的速度和效率，从而快速评价多种设计方案。

2.5.3 Mechanical/Pro（Pro/E 接口模块）

Mechanical/Pro 是连接 Pro/ENGINEER 与 ADAMS 的桥梁。二者采用无缝连接的方式，使 Pro/ENGINEER 用户不必退出其应用环境，就可以将装配的组成根据其运动关系定义为机构系统，进行系统的运动学仿真、干涉检查、确定运动锁止的位置、计算运动副的作用力。

Mechanical/Pro 是用 Pro/Develop 工具创建的，因此 Pro/ENGINEER 用户可以在其熟悉的 CAD 环境中创建三维机械系统模型，并对其运动性能进行仿真分析。通过相应的按键操作，可将数据传送到 ADAMS 中，进行全面的动力学分析。

2.6 ADAMS 软件专用领域模块

2.6.1 ADAMS/Car（轿车模块）

虚拟样机技术是缩短车辆研发周期、降低开发成本、提高产品设计和制造质量的重要途径。为了降低产品开发风险，在样车制造出来之前，利用数字化样机对车辆的动力学性能进行计算机仿真，并优化其参数就显得十分必要了。

ADAMS/Car 是 MDI 公司与 Audi、BMW、Renault、Volvo 等公司合作开发的整车设计软件包，集成了他们在汽车设计、开发方面的专家经验，能够帮助工程师快速建造高精度的整车虚拟样机，其中包括车身、悬架、传动系统、发动机、转向机构、制动系统等。工程师可以通过高速动画直观地再现在各种试验工况下（例如天气、道路状况、驾驶员经验）整车的动力学响应，并输出关于操纵稳定性、制动性、乘坐舒适性和安全性的特征参数，从而减少对物理样机的依赖，而仿真时间只是进行物理样机试验的几分之一。

ADAMS/Car 采用的用户化界面是根据汽车工程师的习惯而专门设计的。工程师不必经过任何专业培训，就可以应用该软件开展卓有成效的开发工作。ADAMS/Car 中包括整车动力学模块（Vehicle Dynamics），如图 2-6 所示，还有悬架设计模块（Suspension Design），如图 2-7 所示。其仿真工况包括方向盘角阶跃、斜坡和脉冲输入、蛇行穿越试验、漂移试验、加速试验、制动试验、稳态转向试验等，同时还可以设定试验过程中的节气门开度、变速器档位等条件。

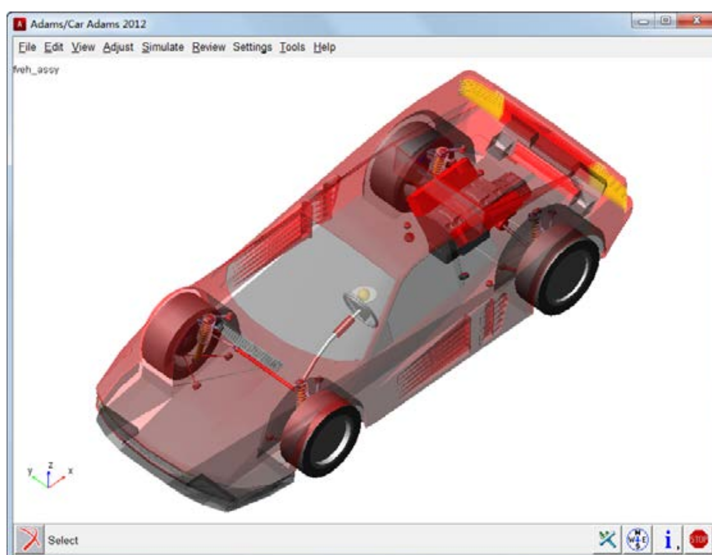


图 2-6　整车动力学模块

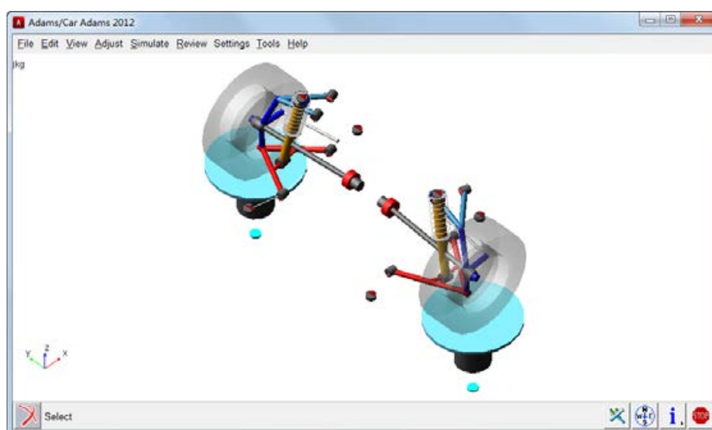


图 2-7　悬架设计模块

Suspension Design 中包括以特征参数（前束、定位参数、速度）表示的概念式悬架模型。通过这些特征参数，工程师可以快速确定在任意载荷和轮胎条件下的轮心位置和方向。在此基础上，可快速创建包括橡胶衬套等在内的柔性体悬架模型。

应用 Suspension Design，工程师可以得到与物理样机试验完全相同的仿真试验结果。Suspension Design 采用全参数的面板建模方式，借助悬架面板，工程师可以提出原始的悬架设计方案，然后通过调整悬架参数（例如连接点位置和衬套参数）就可以快速确定满足理想悬梁特性的悬梁方案。

Suspension Design 可以进行的悬梁试验包括单轮激振试验、双轮同向激振试验、双轮反向激振试验、转向试验、静载试验等，输出 39 种标准悬架特征参数。

2.6.2 ADAMS/Driveline（动力传动系统模块）

ADAMS/Driveline 是 ADAMS 推出的全新模块，利用此模块，用户可以快速地创建、测试具有完整传动系统或传动系统部件的数字化虚拟样机，也可以把创建的数字化虚拟样机加入到 ADAMS/Car 中进行整车动力学性能的研究。ADAMS/Driveline 从 ADAMS/Car 中继承了关键的特征，如模板、参数及可扩展的仿真环境，与 ADAMS/Car 和 ADAMS/Engine 一起构成完整的车辆仿真工具。

使用 ADAMS/Driveline 模块，可以快速创建完整的、参数化的传动系统，研究扭矩的传递及分配，模拟传动系统的装配及振动分析，也可预测部件的疲劳寿命，获得 NVH（振动、噪音、冲击）特性，如图 2-8 所示。利用该模块创建的包含传动系统的虚拟样机可加入到 ADAMS/Car 中分析研究整车（如前轮驱动、后轮驱动以及全轮驱动）的动力学性能。

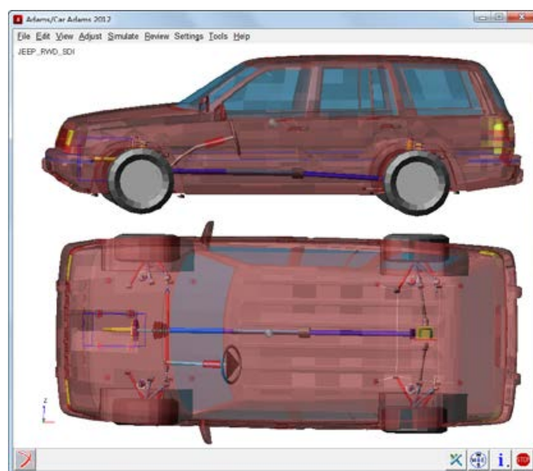


图 2-8　动力传动系统模块

2.6.3 ADAMS/Tire（轮胎模块）

ADAMS/Tire 是研究轮胎、道路相互作用的建模可选模块。工程师利用该模块可以更方便地计算侧向力、自动回正力矩及由于路面不平而产生的力，以便对装备不同轮胎的整车在各种路面条件下进行多组道路试验。

ADAMS/Tire 可以计算轮胎受到的垂向、纵向和侧向载荷，仿真研究车辆在制动、转向、加速、滑行、滑移等大变形工况下的动力学特性，研究车辆的稳定性，计算汽车的

偏转、俯仰和侧倾特性。其输出的力和加速度数据，可以作为有限元软件包的输入载荷进行相应的应力和疲劳特性研究。

ADAMS/Tire 模型的数据输入形式多样，既可以是轮胎特性，也可以是试验数据表。轮胎模型仿真界面如图 2-9 所示。软件中包含荷兰 Delft 工业大学 HansPacejka 教授与瑞典 Volvo 汽车公司合作开发的“Magic Formula”轮胎模型（MF 轮胎）。

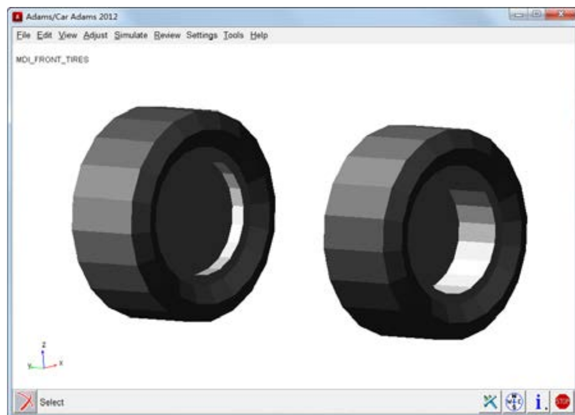


图 2-9　轮胎模型

2.6.4　FTire Modle（柔性环轮胎模块）

FTire（Flexible Ring Tire）Model，是 ADAMS/Tire 的新增模块，是一个 2.5 维的非线性轮胎模型，轮胎的胎体由一些环形元素来代替，一般为 50～100 个元素，通过刚性弹簧互相连接起来。这些环形元素相对于轮辐可以在任意方向弯曲。FTire 与 TYDEX 基本轮胎界面一致。

FTire 模块主要是针对车辆的乘坐舒适性、耐久性及操纵性能方面的应用而设计的。该模块在模型的逼真度、细节与计算速度之间提供了一个有效的折中方法；在频域方面提供了有效的分析结果，频率可高达 120Hz；容易从轮胎的测量数据中获得模型参数；对波长降到轮胎接地尺寸的一半的小障碍物，能够得出有效的结果；当在凸凹不平的路面上时，能提供很高的精确值。

2.6.5　ADAMS/FBG（柔性体生成器模块）

ADAMS/FBG（Flexible Body Generator）模块实际上是在 ADAMS 中集成了一个简单的 FEA 求解器，是 ADAMS 由系统动力学到结构动力学的一次重要功能扩展，其主要作用是为 ADAMS/Car、ADAMS/Engine、ADAMS/Rail 等采用模板建模方式配备选装模块。利用此模块，可以根据 AFI（AutoFlex Input）文件自动生成形状复杂的柔性体，以便在仿真分析中研究柔性部件的变形，更加精确地预测载荷，提高仿真的准确度。AFI 文件是

文本文件，通过定义几何体形状、材料及相关属性等，创建 MNF（Modal Neutral File）文件，该文件为柔性体的有限元输出文件，定义了柔性体的特性。

使用该模块，把中心线、横截面、柔性元素等信息写入到 AFI 文件中，利用 ADAMS/FBG 对输入的 AFI 文件进行解析，从而生成相应的 MNF 文件，然后把 MNF 文件导入到采用模板建模方式的模块中，把生成的柔性体信息赋予已存在的柔性体，或者创建一个新的柔性体。

2.6.6　EDM（经验动力学模型）

虚拟样机功能的发展归功于 MDI 公司与 MTS 系统公司共同开发的 EDM（Empirical Dynamics Models）经验动力学模型。利用 EDM 可快速创建基于试验数据的高精度弹性件模型，特别是在设计复杂的悬架、阻尼器、衬套、发动机悬置、轮胎等时。以前复杂模型的创建依赖于零部件的详细几何、物理属性以及物理特性。由于 EDM 是基于试验数据的，能进行自我校验，减少了试验验证工作，节约了计算时间。经验动力学模型易于生成和使用，不仅适用于部件装配，也适用于系统装配。

使用 EDM 在产品开发的早期就可以创建高精度的弹性元件模型。它与传统的模型相比，适用于较高的振幅和频率范围；与传统的利用几何等信息创建的模型相比，运算速度显著提高，加速了车辆的开发过程，缩短了研制周期。

2.6.7　ADAMS/Chassis（FORD 汽车公司专用模块）

ADAMS/Chassis 模块是 MDI 公司为美国 FORD 汽车公司开发的专用汽车分析仿真模块，如图 2-10 所示。

ADAMS/Chassis 模块的主要功能特点如下：

- 在 SDI 环境中，具有完善的整车控制功能。
- 具有基于 EDM 的冲击模型，能与 ADAMS/Hydraulics、Solver 编码相集成。
- 能与外部源——编码控制系统相集成。
- 具有完整连接器、立体轴向拖臂的后悬架模块。
- 扩展了弹簧阻尼缓冲器附加选择。
- 在标准模板中，支持两级弹簧阻尼缓冲器机构。

另外，该模块支持数据库文件的更新，优化了附加选择方法，巩固了现有的转向系统模板。为了更有效地利用硬盘空间，新版本中增加了输出/结果文件标志，该标志便于 ADAMS/Chassis 控制是否要生成输出结果文件，输入/输出文件标志设定可以更有效地利用磁盘空间。该模块还增强了建模方法和仿真功能，增加了自由运动仿真、新悬架模型以及图形接口功能，使之能与 ADAMS/Insight 相集成。

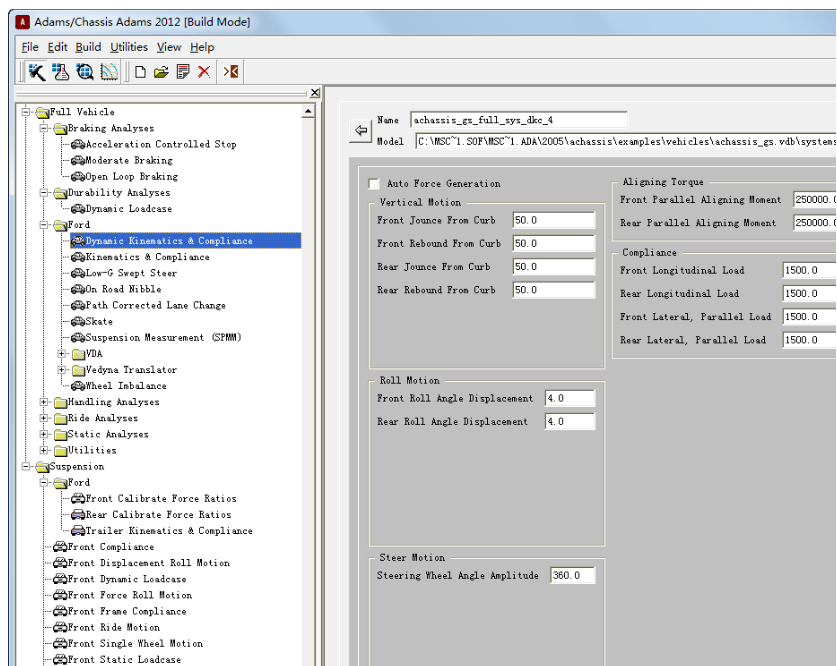


图 2-10　FORD 汽车公司专用模块

2.7　ADAMS 软件工具箱

2.7.1　ADAMS/SDK（ADAMS 开发工具包）

利用 ADAMS/SDK（Software Development Kit），用户可以把运动仿真功能完全集成到自己的软件包中，也可以为已有的产品增加更强的运动仿真能力。集成后的工具包与 ADAMS 具有同样的仿真分析功能。

ADAMS/SDK 使用流行的 C 或 C++语言作为编程接口环境。可以快速、简单、有效地在用户软件包中增加运动仿真功能。用户通过集成 ADAMS 在各行业中已验证的经验，可以大大地节省在运动仿真开发方面的投资。

ADAMS/SDK 可以广泛应用于 CAD 软件中的运动学和动力学工具、CAD 软件中装配位置的确定、制造业中的动态仿真、数字化装配运动回放及工业特殊用途的运动仿真等方面。

2.7.2　Tracked/Wheeled Vehicle（履带/轮胎式车辆工具箱）

ATV 工具箱是 ADAMS 用于履带/轮胎式车辆的专用工具箱，是分析军用或商用履带/轮胎式车辆各种动力学性能的理想工具。

通过 ATV 工具箱可以将 CAD 软件中的车辆模型直接传到 ADAMS 中,然后与履带/车轮及地面模型直接装配成系统模型。利用 ADAMS 仿真工具，可以研究车辆模型在各种路面、不同车速和使用条件下的动力学性能。利用经过验证的参数化模型，可以研究在各种使用条件下系统参数对整个车辆性能的影响，并确定所需性能的参数值。

2.7.3 ADAMS/Gear Tool（齿轮传动工具箱）

ADAMS/Gear Tool 可以快速地计算齿轮之间的传动特性，捕捉齿在啮合前、后的动力学行为，可以在一个模型中研究直齿、斜齿及摩擦的动力学性能，方便快捷地对轮系（包括行星轮系）进行仿真。它包括一个对话框、3 个宏、一个 gforsub（G-Force 子程序）和 3 个 Fortran 文件。

ADAMS/Gear Tool 建模方便，仅需标准齿轮参数（齿轮模数、节圆直径等）即可。它能够利用渐开线函数方程计算齿轮几何形线、啮合点、齿轮啮合力（内齿和外齿）；能够通过对轴距和齿厚的改变来模拟锥齿传动；能够考虑齿轮轴的弹性和非绕齿轮中心轴线转动的齿轮传动等。

第 3 章

建立模型

本章详细讲解 ADAMS/View 的启动及界面，然后介绍 ADAMS/View 模块的几何建模过程。通过学习几何建模工具，熟悉如何建构几何体、实体几何体、复杂几何图形、柔性梁等，以及如何修改几何体及构件特性。最后结合一个实例达到学以致用的目的。

学 习 要 点

- ADAMS/View 命令操作
- 几何建模

3.1 ADADMS/View 命令操作

3.1.1 启动 ADAMS/View

启动 ADAMS/View 有 3 种方式：

（1）Windows 开始菜单启动：“开始”→“所有程序”→“MSC.Software”→“Adams 2012”→“AView”→“Adams-View”，如图 3-1 所示。

（2）双击桌面上的快捷方式 Adams - View 2012。

（3）从命令提示符下启动 Adams。

1）在命令提示符（或运行窗口）下首先进入 Adams 2012 安装目录，如 C:\MSC.Software\Adams\2012\common，键入 mdi 并回车，出现如图 3-2 所示窗口信息。从图中可以看出，窗口分为两列，Action 列和 Selection Code 列。Action 列为启动程序选项，Selection Code 列为对应操作选项的键入值，在这里要启动 ADAMS/View，其对应的键入值为 aview。

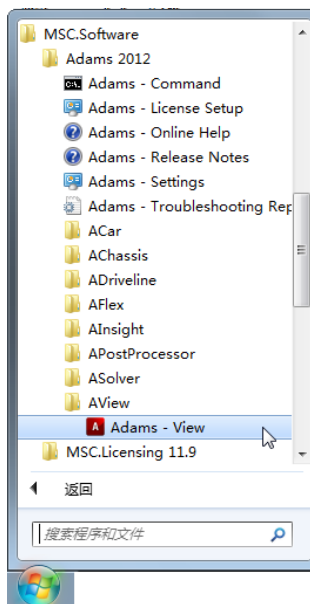


图 3-1 启动 MD Adams

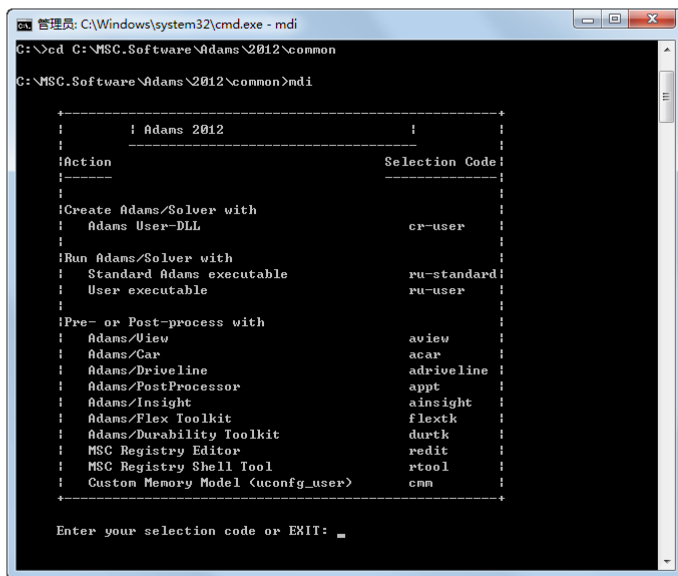


图 3-2 启动 Adams 命令窗口信息

2）键入 aview 并回车，出现如图 3-3 所示窗口。此窗口仍然有两列，启动 ADAMS/View 的标准窗口，键入 ru-standard 并回车。

3）出现如下提示：

Would you like to run in Interactive or Batch mode? Enter i，b or EXIT（<CR=i>），

直接回车，此时就启动了 ADAMS/View 的标准窗口。

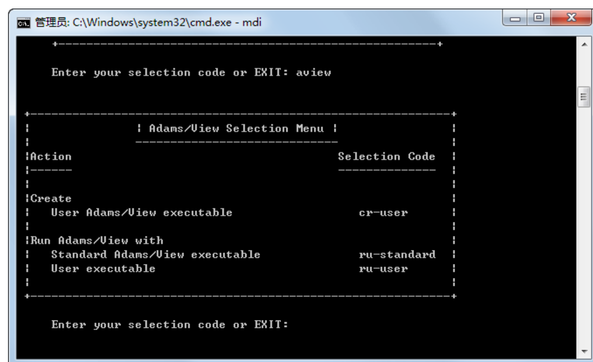


图 3-3　启动 View 命令窗口信息

ADAMS/View 启动之后会出现 Welcome 欢迎窗口，如图 3-4 所示。

在欢迎窗口中选择要进行的操作，如图 3-4 所示。

包括的 3 个选项分别为：

- ✧ New Model：创建一个新的模型文件；
- ✧ Existing Model 数据库：打开一个已经存在的模型文件；
- ✧ Exit:退出 ADAMS/View 建模环境。

（4）建立新的模型文件。在欢迎窗口中选择 New Model 选项，创建一个新的模型文件。此时弹出“Create New Model”对话框，如图 3-5 所示。可以对新建的模型环境进行设置，在 Model name 文本框中输入新创建模型的名称，在 Gravity 项中设置建模环境的重力加速度，在 Units 项中设置建模的单位，在 Working Directory 项中设置工作目录。

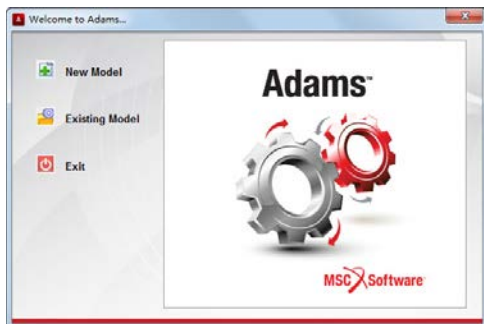


图 3-4　欢迎窗口

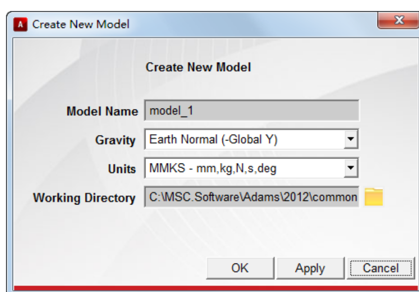


图 3-5　“Create New Model”对话框

其中，重力加速度的设置有 3 个可选项：

- ✧ Earth Normal (-Global Y)：设置重力加速度大小为 1g，方向为-Y 方向；
- ✧ No Gravity：不设置重力加速度；
- ✧ Other：根据具体情况自定义设置重力加速度。此时，单击 Welcome 对话框中的 OK 按钮后，将显示设置重力加速度对话框。

此处单位设置 ADAMS 为我们提供了常用的 4 种预定以选择：

- ✧ MMKS：毫米、千克、秒；
- ✧ MKS：米、千克、秒；
- ✧ CGS：厘米、克、秒；
- ✧ IPS：英寸、磅、秒。

在工作目录指定区按按钮可选择工作目录，以后所有操作都将默认为在此指定工作目录下进行。

如果不对上述各选项进行设置，ADAMS/View 将使用默认的模型名称、默认加速度和单位设置。

（5）打开一个已经存在模型文件。在 Welcome 对话窗口中选择 Existing Model 选项，可以打开指定路径下的模型文件，如图 3-6 所示。

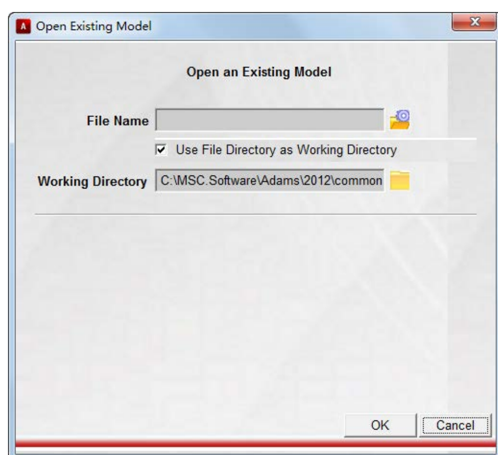


图 3-6　打开已有文件操作选项

单击按钮显示模型文件浏览对话框，如图 3-7 所示。选择要打开的模型文件，ADAMS/View 将自动加载该模型及其相关的设置。

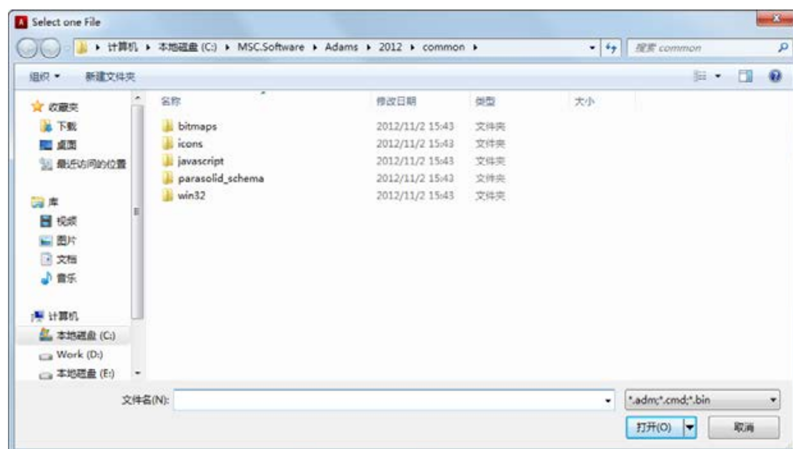


图 3-7　浏览文件对话框

3.1.2 ADAMS/View 界面

启动 ADAMS/View 后，ADAMS/View 关闭 Welcome 对话窗口，进入 ADAMS/View 的主窗口的默认界面，如图 3-8 所示。

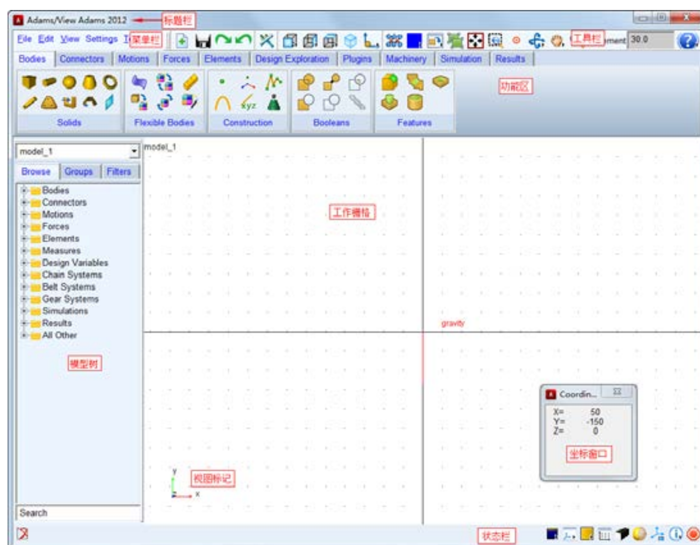


图 3-8 主窗口默认界面

单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”。可以将界面切换为经典界面，如图 3-9 所示。在经典界面操作要比默认界面简单便捷，以后的讲解中将以经典界面为主。

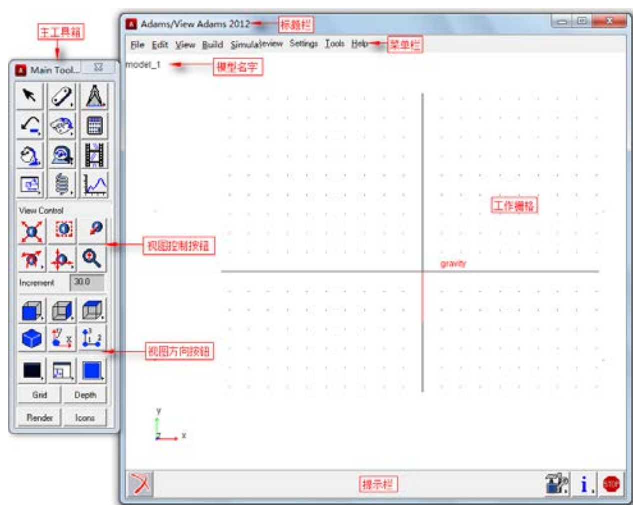


图 3-9 主窗口经典界面

可以在 Settings 菜单栏中对操作界面进行设置，设置完成后可以单击“Settings”→“Save Settings”，对设置后的界面进行保存。界面内容介绍如下：

（1）标题栏：显示 ADAMS 的功能模块名字及版本信息。

（2）菜单栏：ADAMS/View 的菜单栏采用了 Windows 的菜单风格，中包括了 ADAMS/View 的所有主菜单名称，每个主菜单都有下拉菜单，其下拉菜单中包括了相应的子菜单和操作命令，将鼠标移动到相应的菜单上就会自动显示其下一级子菜单。菜单栏几乎包括了 ADAMS/View 的所有命令，例如编辑、视图、建模、仿真分析、回放仿真分析结果、各种设置、各种工具、帮助等。

子菜单又会根据不同的功能分成几组，组与组之间用线分开，每个菜单命令一般又由两部分组成：一是命令名称，二是相应命令的快捷键。可以通过选取命令菜单来执行命令，也可以通过快捷键来执行。部分常用命令的快捷键见表 3-1。

表 3-1　常用快捷键

快捷键	功能说明	快捷键	功能说明
Ctrl+N	创建一个新的数据库	Ctrl+X	删除对象
Ctrl+O	打开一个已经存在数据库	Ctrl+V	粘贴对象
Ctrl+S	保存当前数据库	F1	显示帮助窗口
Ctrl+P	打印	F3	显示命令窗口
Ctrl+Q	退出 ADAMS/View	F4	显示坐标窗口
Ctrl+Z	放弃最后一步操作	F8	进入后处理
Ctrl+E	修改对象	g	工作栅格的显示切换
Ctrl+C	复制对象	f	显示整个样机的视图

（3）主工具箱（Main toolbox）：ADAMS/View 的主工具箱中包含了各种常用命令的快捷图标，如图 3-10 所示。主工具箱分成两大部分，第一部分为上部的 12 个图标——几何建模图标、添加约束图标、施加载荷图标、设置对象颜色图标、设置视图方向图标、仿真分析图标、动画播放图标、绘制曲线图快捷图标等。剩下的为第二部分，这部分随当前所处的选择项不同而不同，当选中选择图标时，为视图图标，当选中别的图标时，则为相应命令图标的参数设置窗口。在这些图标中，有的图标的右下角有一个小三角标志，表示这是一个命令集，还包含子图标。将鼠标移到这种图标上，击鼠标右键，会弹出该图标包含的所有子图标。在相应的子图标上单击鼠标左键，即可以选定该子图标，进行相应命令的执行，如果双击鼠标左键，则可以重复执行该命令。

主工具箱上部的 12 个图标所代表的命令或命令集如表 3-2 所示。

（4）工作栅格（Grid）：在工作屏幕区可以设置显示工作栅格，以利于建模，也可以设置不显示。工作栅格的形状和栅格点之间的距离也可以进行设置。单击菜单栏中【Settings】→【Working Grid】，弹出调整栅格对话框，如图 3-11 所示。

表 3-2　主工具箱图标

图标	功能说明	图标	功能说明
	选择命令		添加运动命令集
	取消或再做一次命令		添加力命令集
	颜色设置命令		测量距离和角度命令集
	旋转和移动命令		仿真分析命令
	几何建模命令集		仿真结果回放命令
	添加约束命令集		调用后处理模块命令

（5）状态栏（Status Toolbar）：显示操作过程中的各种信息和提示。

（6）坐标窗口（Coordinates）：按 F4 键可以显示坐标窗口，显示当前光标所在位置处的三维坐标值，如图 3-12 所示。



图 3-10　主工具箱

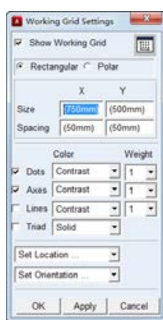


图 3-11　栅格设置对话框

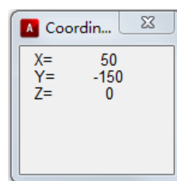


图 3-12　坐标窗口

（7）视图标记：通常在工作屏幕区的左下方，如图 3-13 所示。

可以显示一个表示当前系统的地面坐标系方向的三维坐标。若要调整视图方向，可以通过选择工具箱中的视图按钮，如图 3-14 所示。

在 View 菜单中选择 Toolbox and toolbars 项，显示 Tool settings 对话框，可以设置打开或关闭主工具箱、快捷工具栏和状态栏，如图 3-15 所示。

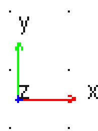


图 3-13　视图标记

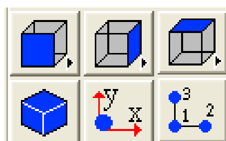


图 3-14　“视图”工具箱

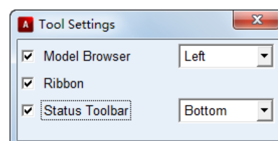


图 3-15　设置工具栏

3.2 几何建模

3.2.1 几何建模基础知识

（1）几何体类型：ADAMS/View 为提供了 4 种类型的零件：

- 刚体。这类几何体具有质量特性和转动惯量特性。其几何形状在任何时候都不会发生改变。它们是 ADAMS/View 中最常用的一类几何体，默认创建的几何体都为刚体。刚体可以相对于其他零件运动，且可以作为测量其他零件的速度和加速度的参考。
- 柔性体。这类几何体也具有质量特性和转动惯量特性，它们在受力的情况下会发生弯曲。在 ADAMS/View 中，可以创建离散的柔性连杆，从而获得柔性体。要获得更多的柔性体功能，可以购买 ADAMS 为设计的柔性模块 ADAMS/Flex。
- 点质量。这类几何体只具有质量特性，因为不具有几何外形，所以没有转动惯量特性。
- 大地。这类几何体没有质量和速度，并且其自由度为零。大地是模型中唯一在任何时候都静止的零件。在创建模型时，ADAMS/View 会自动创建一个大地零件。大地零件定义了地面坐标系的位置，在默认状态下，大地是所有几何体的速度和加速度的惯性参考坐标，还可以定义一个新的大地或指定已经存在的几何体为大地。当建立了一个模型，而这个模型只是实际系统中的一个小子系统，那么这个功能就变得非常有用。例如，想建立一个车门把手模型，这时就可以将门作为大地零件建立一个简单模型。如果想扩展模型，使门可以在车上旋转，就必须指定一个新的几何体来代表车体作为大地，并且把原来的大地用一个转动副连接到车体上。

（2）几何体坐标系：当新创建几何体时，ADAMS/View 会为它们分配一个坐标系，即几何体的局部坐标系。在仿真过程中，局部坐标系会随着几何体的运动而运动，零件的尺寸和形状相对于该局部坐标静止不变。

零件局部坐标在地面坐标系中的位置和方向，确定了几何体所在的位置和方向。

（3）几何体的自由度：创建的每个刚体都可以在它的所有自由度移动或转动，点质量可以在 3 个自由度上移动。可以通过以下方法来约束几何体的运动：

- 把几何体加到大地上：这意味着几何体和大地固结在一起，在任何方向都不能运动。
- 给几何体加约束：例如加铰链，铰链定义了几何体之间的连接方式以及它们之间的相对运动方式。

（4）几何体的命名：创建几何体时，ADAMS/View 会根据它的类型和模型中同类几何体的数量而自动地为几何体取一个名称。例如当创建第一个点质量时，ADAMS/View 命

名它为 POINT_MASS_1，产生第二个点质量时，命名为 POINT_MASS_2。

除点和坐标标记点外的各种形状的刚体，ADAMS/View 用 PART 来命名，并且始终将 ADAMS/View 自动创建的大地作为第一个构件，因此创建的构件都是从 PART_2 开始命名的。例如先创建了一个球体，ADAMS/View 用 PART_2 命名它，接着又创建了一个圆柱体时，ADAMS/View 用 PART_3 命名它，以此类推。

可以根据需要，对零件和几何体重新命名。

（5）鼠标的应用：鼠标是最常用的程序操作工具，ADAMS/View 的鼠标应用有两种方式，鼠标左键和鼠标右键。

ADAMS/View 使用鼠标左键，选择样机模型中的各种对象、选择菜单栏中的命令和对话框中的有关命令。

在 ADAMS/View 中，鼠标右键是非常有用的，在不同的地方点击右键有不同的作用。使用鼠标右键的场合主要有：

1）显示建模过程中屏幕上的各种对象弹出式菜单，例如：构件、标记、约束、运动和力等。

2）在各种输入对话框中的参数文本输入栏，显示输入参数的弹出式菜单。

3）在后处理过程中，显示曲线图中各种对象的弹出式菜单，例如：曲线、标题、坐标、符号标记等。

4）主工具箱等有工具图标集的场合，显示其二级图标。

打开弹出式菜单或工具集以后，按住右键，拖动鼠标至有关命令项，可以打开下一层弹出式菜单或选择命令。

3.2.2 建模前的准备工作

（1）工作栅格的设置：工作栅格是非常有用的建模辅助工具。ADAMS/View 启动之后，程序会默认显示一个工作栅格平面，在建模、移动和修改模型零件时，程序会自动捕捉到栅格点上。栅格的设置方法如下：

1）在菜单栏的 Settings 菜单中选择 Working Grid 命令，打开工作栅格设置对话框，如图 3-16 所示。其中：

显示设定区：设置是否显示栅格。选中该选项，则显示栅格，否则不显示。

栅格类型区：设置栅格形状，有 Rectangular（矩形）和 Polar（极坐标）形式。

尺寸、间隔设定区：设置栅格的大小和栅格点间距。Size 设定栅格的尺寸，Spacing 设定栅格点之间的距离。当栅格形状为 Rectangular 时，Size 设定栅格在 X、Y 方向的尺寸，Spacing 设定栅格点之间在 X、Y 方向的间隔。

显示对象设置区：选择显示对象及其颜色（Color）和线条宽度（Weight）。其中：

- Dots：设置栅格点的显示及其颜色和大小。

- Axes：设置栅格轴的显示及其颜色和轴线的线宽。
- Lines：设置栅格以网格形式显示，及其网格线的颜色和网格线的线宽。
- Triad：设置是否在工作栅格中心设置坐标图标。

栅格位置设定区：设定工作栅格中心所在的位置。可以定义在全局坐标的原点，也可以选择放置的位置。

栅格方向设定区：设置工作栅格平面的方向。可以设定为全局坐标的 3 个坐标面，也可以通过选择两个轴来定义栅格平面的方向或通过定义几个通过工作栅格平面的点的方法来定义栅格平面的方向。

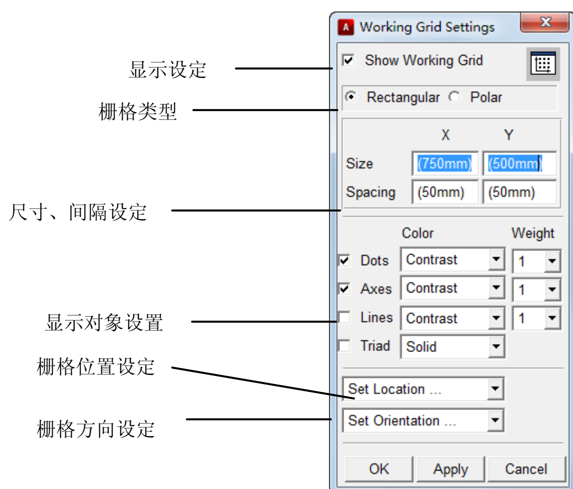


图 3-16　工作栅格设置对话框

2）选择 OK 按钮，应用设置并关闭栅格设置窗口；选择 Apply 按钮，应用设置但不关闭栅格设置窗口。

（2）坐标系设置：ADAMS/View 为提供了 3 种坐标系统：笛卡儿坐标、圆柱坐标和球坐标。在默认情况下 ADAMS/View 采用笛卡儿坐标系作为地面坐标系。为了建模的方便，可以根据需要设置地面坐标的形式。

在菜单栏的 Settings 菜单中选择 Coordinate System 命令，打开坐标系设置对话框，如图 3-17 所示。其中：

坐标类型区：选择要使用的坐标类型，Cartesian（笛卡尔坐标）、Cylindrical（圆柱坐标）和 Spherical（球坐标）。

旋转顺序区：设置绕坐标轴旋转的先后顺序。ADAMS/View 用 1、2、3 分别表示 x、y、z 轴，定义对象的旋转，除了需要定义绕坐标轴旋转的 3 个方向角之外，还要指出绕坐标旋转的先后顺序。例如旋转循序 313 表示，首先绕 z 轴旋转，然后绕 x 轴旋转，最后再绕 z 轴旋转。ADAMS/View 提供了 24 种不同的旋转顺序序列供选择。默认状态下，ADAMS/View 采用 313 旋转顺序序列。

方向坐标类型区：设置方向坐标的类型。有两种类型的方向坐标：一种是定位于构件的旋转（Body Fixed）；另一种是定位于空间的旋转（Space Fixed）。各项设置完后单击 OK 或 Apply 按钮完成坐标系的设置。

（3）单位设置：建模前要对模型所使用的单位进行设置，ADAMS/View 中单位的设置可以在 ADAMS/View 启动时的欢迎窗口中进行设置，如图 3-5 所示，前面已经有较详细的介绍。还可以进入 ADAMS/View 的主窗口后进行设置，设置方法如下：

1）在菜单栏的 Settings 菜单中选择 Units 命令，打开 Units Settings 对话框，如图 3-18 所示。从图中可以看出 ADAMS/View 有长度、质量、力、时间、角度和频率 6 个基本度量单位。

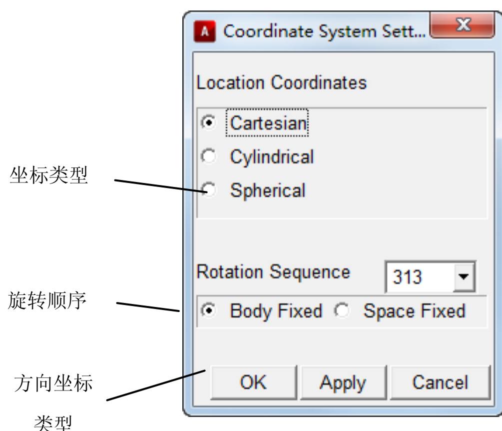


图 3-17 坐标系设置对话框

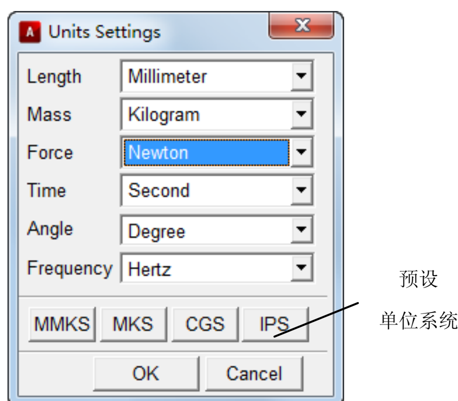


图 3-18 单位设置对话框

2）在单位设置对话框中，ADAMS/View 预设了 4 个度量单位系统，如果要采用这 4 个预设的单位系统中的任何一个，选择相应的按钮即可。如果这些预设的单位系统不满足的要求，可以在每个度量单位的单位选择栏直接选择要使用的单位，定义自己的单位系统。预设单位系统如表 3-3 所示。

表 3-3 预设单位系统

单位系统	长度单位	质量单位	力单位	时间单位	角度单位	频率单位
MMKS	mm（毫米）	kg（千克）	N（牛顿）	s（秒）	°（度）	Hz（赫兹）
MKS	m（米）	kg（千克）	N（牛顿）	s（秒）	°（度）	Hz（赫兹）
CGS	cm（厘米）	g（克）	dan（达因）	s（秒）	°（度）	Hz（赫兹）
IPS	in（英寸）	lb（磅）	lbf（磅力）	s（秒）	°（度）	Hz（赫兹）

3.2.3　几何建模工具

ADAMS/View 提供了非常丰富的基本几何体建模工具，调用几何建模工具有两种方法：在主工具箱上选择几何建模工具图标，或通过菜单栏选择几何建模工具命令。

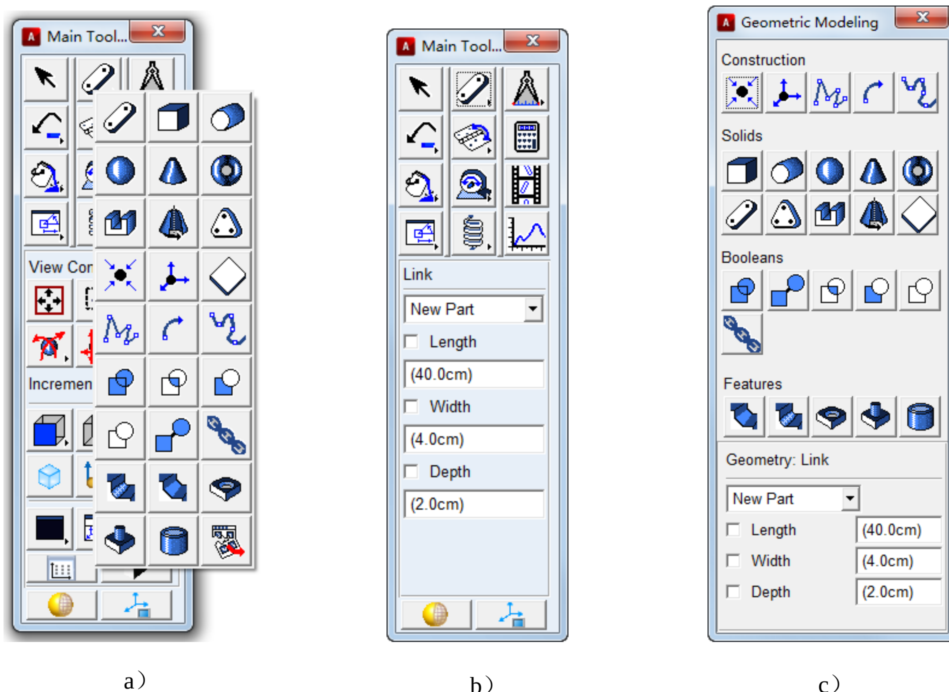
1．利用几何建模工具图标建模

（1）在主工具箱中，用鼠标右键选择几何建模工具按钮，弹出如图 3-19a 所示的几何建模工具集。

（2）在几何建模工具集中用鼠标左键选择相应的图标，或按住右键不放，将鼠标移动到所要选择的建模图标上，然后释放右键，即可选中相应的建模工具。

（3）此时，主工具箱下部显示内容发生变化，显示与所选建模工具相对应的基本参数设置对话栏，可以通过设置这些基本参数来控制创建的几何体。例如图 3-19b 中为选中连杆建模工具时，主工具箱的下部显示与创建连杆相关的参数设置项——连杆的长度、宽度和厚度。设置好这些参数后，ADAMS/View 就会按照设定的尺寸来创建连杆，而忽略鼠标拖动的作用。

（4）如果希望显示更为详细的浮动建模工具和基本参数设置对话框，可以选择几何建模工具集中的图标。



a）　　b）　　c）

图 3-19　几何建模工具

（5）按照 ADAMS/View 主窗口中状态栏的提示，绘制几何图形。

启动 ADAMS/View 后，主工具箱中几何建模按钮图标的默认值为连杆工具图标。以后自动保持上一次所用的建模工具图标。如果选用主工具箱中的默认图标，可以直接在默认图标上单击鼠标左键完成选取。

2．通过菜单建模

在主窗口菜单栏中选择 Build 菜单，并选择 Bodies/Geometry 项，显示浮动建模工具对话框，如图 3-19c 所示。从中选择绘制几何形体工具，再选择输入建模参数并绘制模型。

3.2.4　创建基本几何体

ADAMS/View 中基本几何形状包括：关键点（Point）、标记点（Marker）、直线（Line）和多段线（Polyline）、圆弧（Arc）和圆（Circle）、多义线（Spline）。这些几何体没有质量，主要用于定义其他几何形状和几何体。其中关键点和标记点是最常用的几何建模辅助工具。

1．创建关键点

几何建模时，通过预先设置的若干三维空间关键点，可以确定不同构建的连接点和位置。此外，对点坐标进行参数化是进行参数化仿真分析的基础。

关键点不能定义方向，只能定义位置。当创建关键点时，可以将它建在大地上或其他零件上。

此外还可以指定是否将关键点附近的其他零件放到这个关键点上。如果其他零件放到关键点上，这些零件的位置就由这个关键点的位置决定。当改变这个关键点的位置时，所有加到这个关键点上的零件的位置都会随之改变。

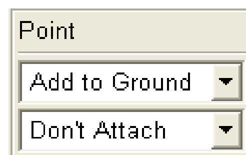


图 3-20　设置对话框

创建关键点的步骤：

（1）从主工具箱中的几何建模工具集中，选择关键点图标。

（2）在工具栏下方出现设置对话框，如图 3-20 所示。

设置下列参数：

- 选择关键点是放在大地上（Add to Ground），还是放到零件上（Add to Part）。
- 选择是否要将附近的对象同关键点关联，Don’t Attach 参数表示不关联，Attach Near 参数表示关联。

（3）如果选择了将关键点放置到另一个零件上，此时状态栏显示 Select the Body，则选择要放置点的零件。

（4）此时状态栏显示：Point: Select the point location。根据状态栏提示，在希望放置的位置单击鼠标左键，完成关键点的创建。



提示

- 不能将零件的质心标记点加到关键点上。如果将质心标记点加到关键点上，ADAMS/View 会时刻计算零件的质心位置，除非事先定义好了零件的质量特性。
- 如果想将关键点放置在另一个零件的位置上，可以在那个零件附近单击鼠标右键，ADAMS/View 会显示鼠标附近零件的列表，选择想放置关键的零件。
- 如果想指定精确的坐标，离开零件，单击鼠标右键。此时会弹出一个输入设置关键点位置的对话框。

2．创建坐标标记点

可以通过创建坐标标记点的方式建立局部坐标系。标记点具有位置和方向。ADAMS/View 会在所有实体的质心和决定实体空间位置的地方自动创建标记点。例如，一个连杆有 3 个标记点，两个位于连杆的端点，一个位于它的质心。当为零件施加约束时，如在零件间加铰链，ADAMS/View 也会自动创建标记点。要通过指定标记点的位置和方向来创建标记点。可以使标记点的方向与全局坐标系、当前视图坐标系或自定义的坐标系对齐。

创建标记点的步骤：

（1）从主工具箱中的几何建模工具集中，选择标记点图标。

（2）在工具箱下方出现设置对话栏，如图 3-21 所示。



图 3-21　设置对话框

设置下列参数：

- 选择关键点是放置在大地上（Add to Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。
- 定义标记点方向的方法。从 Orientation 菜单中选择一种定义方向的方法。

（3）如果选择了将标记点放置到一个零件上，则选择那个零件。

（4）将鼠标移到希望的位置单击鼠标左键。

（5）如果想利用除全局坐标系或视图坐标系之外的参数来定义标记点的方向，则选择标记点坐标轴所应对齐的方向，每个坐标轴都要指定对齐的方向。

3．创建直线和多段线

可以创建一段直线（Line）或多段直线（Polyline）。多段线可以是开口的，也可以

是封闭的（多边形），图 3-22 所示为在 ADAMS/View 中创建的直线、开口多段线和封闭多段线。在创建直线或多段线之前，可以指定直线或多段线的每段线段的长度，这样就可以更快地创建确定尺寸的线段和多段线。创建直线时，可以设定直线的倾角，这个倾角为直线与全局坐标或工作栅格的 X 轴所成的角度。

创建直线几何体时，可以创建由直线组成的新零件或将直线几何体放置到一个已经存在的零件或大地上。当创建一个新零件时，由于新零件由直线组成，故没有质量，也可以将直线几何体拉伸成具有质量的几何实体。

ADAMS/View 在创建的几何体的每段线段的端点设置了热点。可以通过拖拽这些热点，方便地改变几何体的形状。如果创建的为一个封闭的多段线图形，无论如何拖拽热点，图形仍保持为封闭。

创建直线的步骤：

（1）从主工具箱中的几何建模工具集中，选择多段线图标。

（2）在工具箱下方出现设置对话栏，如图 3-23 所示。

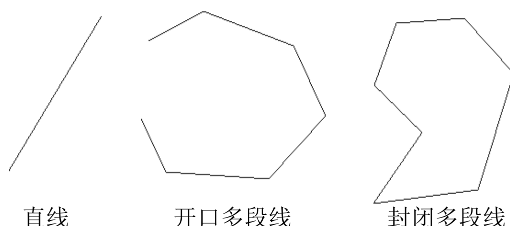


图 3-22　直线和多段线

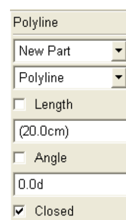


图 3-23　设置对话栏

设置下列参数：

- 选择创建一个由直线几何体组成的新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。
- 设置直线类型为 One Line，同时可以设置直线的长度和倾角。

（3）在直线的起点处单击鼠标左键，在希望的方向移动鼠标，当直线的长度和倾角满足要求时，再次单击鼠标左键，结束画线。

创建多段线的步骤：

（1）从主工具箱中的几何建模工具集中，选择多段线图标。

（2）在设置对话栏，设置下列参数：选择创建一个由多段线几何体组成的新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。设置直线类型为 Polyline，同时可以设置每段线段的长度。

（3）在多段线的起点处单击鼠标左键，拖动鼠标，选择线段的端点，完成第一段线段的创建。如要继续画线段，可再拖动，再选择线段端点，重复动作可以创建多段线段。

（4）要结束多段线的创建，可以单击鼠标右键。如果设定了创建封闭多段线，ADAMS/View 会自动地在第一点和最后一点创建一段线段使图形封闭。



提示

- 单击鼠标右键不会创建新的点。
- 可以单击最后创建的线段的终点来删除这段线段。按照与创建时相反的顺序单击线段的端点可以将各线段删除。

4. 创建圆弧和圆

可以建立以某个位置为圆心的圆弧和圆。创建圆弧时，要指定圆弧的起始角和终止角、圆心位置、圆弧半径和 x 轴的方向。ADAMS/View 以指定的 x 轴按逆时针方向所成的角来确定圆弧的起始角和终止角。

创建圆弧或圆形几何体时，可以创建由它组成的新零件或将几何体放置到一个已经存在的零件或大地上。创建一个新零件时，由于新零件由线组成，故没有质量，也可以将圆拉伸成具有质量的几何实体。

创建圆弧的步骤：

（1）主工具箱中的几何建模工具集中，选择圆弧图标。

（2）设置对话栏，指定下列参数：

- 选择创建一个由直线几何体组成的新零件（New Part），或将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part），默认为创建一个新零件。
- 可以设定圆弧半径。
- 设定圆弧的起始角和终止角。默认为创建一个由 0° 开始的 90° 的圆弧。

（3）在圆弧的圆心单击鼠标左键，然后拖动鼠标到希望的半径处和 x 轴方向。ADAMS/View 会在屏幕上显示一条线来表示 x 轴。如果在设置栏里指定了圆弧的半径，ADAMS/View 会采用这个设定值，而忽略鼠标的拖动。

（4）在半径达到要求时单击鼠标左键。

创建圆的步骤：

（1）主工具箱中的几何建模工具集中，选择圆弧图标

（2）在工具箱下方出现设置对话栏，如图 3-24 所示。

设置下列参数：

- 选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part），默认为创建一个新零件。
- 可以设定圆的半径。
- 选择 Circle。

（3）在圆的圆心单击鼠标左键，然后拖动鼠标来定义圆的半径。如果在设置栏里指定了圆的半径，ADAMS/View 会采用这个设定值而忽略鼠标的拖动。

（4）在半径达到要求时单击鼠标左键。

5．创建样条曲线

样条曲线是通过一系列位置坐标的光滑曲线。样条曲线可以是开口的，也可以是封闭的。创建一条封闭的样条曲线至少要指定 8 个点，而创建一条开口的样条曲线则至少要指定 4 个点。

创建样条曲线几何体时，可以创建由样条曲线组成的新零件或将样条曲线几何体放置到一个已经存在的零件或大地上。当选择了创建一个新零件时，由于新零件由样条曲线组成，故没有质量，也可以将封闭的样条曲线拉伸成具有质量的几何实体。

ADAMS/View 在创建的样条曲线的点位置上设置了热点，可以通过拖拽这些热点，方便地改变几何体的形状。

可以通过定义样条曲线所通过点的坐标来创建样条曲线，或者选择一条已经存在的曲线，并指定用于定义样条曲线的点的个数，下面详细说明：

（1）通过在屏幕上选择点定义样条曲线。

1）主工具箱中的几何建模工具集中，选择样条曲线图标。

2）系统打开设置对话栏，如图 3-25 所示。

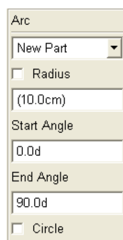


图 3-24　设置对话栏

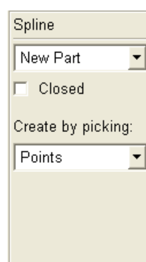


图 3-25　设置对话栏

设置下列参数：

● 选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part），默认为创建一个新零件。

● 定义创建的样条曲线为封闭的或开口的。

3）在起始点单击鼠标左键。

4）选择样条曲线要通过的其他点。封闭的样条曲线至少要指定 8 个点，开口的样条曲线则至少要指定 4 个点。

5）样条曲线要通过的点选择结束后，单击鼠标右键，结束样条曲线的创建。

（2）通过选择一条已经存在的曲线来创建样条曲线

1）主工具箱中的几何建模工具集中，选择样条曲线图标。

2）设置对话栏，指定下列参数：

● 选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part），默认为创建一个新零件。

● 定义创建的样条曲线为封闭的或开口的。

● 选择通过选择曲线（Curve）的方式创建样条曲线。

● 在#Points 文本框中设置点的个数，或者去除 Spread Points 选项，ADAMS/View 会计算所要的点的个数。

3）选择曲线。



提示

● 当指定样条曲线通过的点的时候，如果发现定义有错误，可以以创建时相反的顺序在点上单击鼠标左键来删除错误的点。

● 结束样条曲线的创建后，有时屏幕上只是显示一些热点，而不能显示光滑的样条曲线。此时，可以轻轻拖拽任意热点，屏幕上将显示出样条曲线。

● 可以通过编辑点的坐标来创建精确的样条曲线。

6．创建二维平面

在 ADAMS/View 中，平面用一个二维矩形表示，可以在屏幕上或工作栅格上画出平面的长和宽。在定义物体间的碰撞力时，平面非常有用。平面只是由线框组成，没有质量。平面具有一个热点，通过拖动热点，可以改变平面的长和宽。

创建平面的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择平面图标◇。

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-26 所示。

设置下列参数：选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground）还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

（3）在矩形的一个顶点按住鼠标左键不放并拖动鼠标，当矩形的大小满足要求时释放左键。

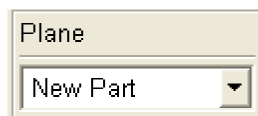


图 3-26　设置对话栏

3.2.5　创建实体几何模型

实体几何模型是三维零件，可以利用 ADAMS/View 的实体建模库创建实体零件或将封闭的曲线拉伸成实体几何模型。此外还可以将简单零件组合成形状复杂的零件或在零件上创建其他的特征，如圆角、导角等。下面介绍如何利用 ADAMS/View 的实体建模库创建实体零件。

1．创建矩形块

在屏幕或工作栅格上画出矩形块的长和宽，ADAMS/View 会创建一个三维实体矩形块，其厚度为矩形的长和宽尺寸中最短尺寸的两倍，也可以预先设定好矩形的长、宽和厚。矩形块的尺寸在屏幕坐标上，向上为宽度，向左为长度，向外为厚度。矩形块有一个热点，通过拖拽热点，可以改变矩形块的长、宽和厚。

创建矩形块的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择矩形块图标。

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-27 所示。指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part），默认为创建一个新零件。

2）可以设置矩形块的长、宽、厚。

（3）在矩形的一个顶点按住鼠标左键不放并拖动鼠标。

（4）当矩形的大小满足要求时释放左键。如果已经指定了矩形块的长、宽、厚，则 ADAMS/View 按照设定创建矩形块。

2．创建圆柱体

圆柱体是截面形状为圆形的实体，默认情况下，只要画出圆柱体的中心线，ADAMS/View 会创建半径为中心线长的 25％的圆柱体，也可以事先指定圆柱体的长和截面半径大小。

圆柱体有两个热点，一个控制圆柱体的长度，另一个控制圆柱体的截面半径。

创建圆柱体的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择圆柱体图标。

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-28 所示。

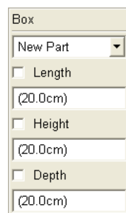


图 3-27　设置对话栏

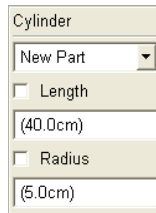


图 3-28　设置对话栏

指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）可以设置圆柱体的长和截面半径。

（3）在合适点单击鼠标左键，然后按住不放并拖动。

（4）当尺寸满足要求时释放左键。如果指定了圆柱体的长和截面半径，ADAMS/View 按照设定值创建圆柱体。

3．创建球体

通过指定球体的中心和半径值创建球体。球体有 3 个热点，分别控制球体的 3 个半径大小。可以通过拖动不同热点改变球体形状的方法生成椭球体。

创建球体的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择球体图标。

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-29 所示。

指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）可以设置球的半径。

（3）在球心单击鼠标左键，然后按住不放并拖动鼠标。

（4）当尺寸满足要求时释放鼠标左键。如果指定了球体的半径，ADAMS/View 按照设定值创建球体。

4．创建锥台

锥台为圆锥体去掉顶部剩下的部分，默认情况下，只要画出锥台长度，ADAMS/View 会创建底部半径为长度的 12.5%，顶部半径为长度的 50%的锥台。锥台有 3 个热点，一个控制锥台的长度，一个控制锥台顶部半径，另一个控制锥台底部半径。创建锥台的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择锥台图标。

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-30 所示。

指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）可以设定锥台的长度和两端半径。

（3）在起点单击鼠标左键，然后按住不放并拖动鼠标。

（4）尺寸满足要求时释放鼠标左键。如果指定了锥台的长度和两端半径，ADAMS/View 按照设定值创建锥台。

5．创建圆环

圆环是环形实体，由圆心和主半径决定，主半径为圆环圆形截面的圆心到圆环圆心的距离。默认 情况下，ADAMS/View 按照圆环的次半径（即圆环圆形截面的半径）为主半径的 25%创建圆环，也可以指定圆环的主、次半径。圆环有两个热点，一个控制圆环的圆形截面的中心线，另一个控制圆环的圆形截面半径。创建圆环的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择圆环图标。
（2）系统设置对话栏，如图 3-31 所示。

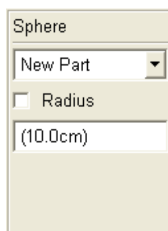


图 3-29　设置对话栏

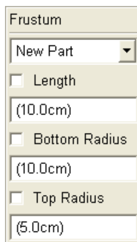


图 3-30　设置对话栏

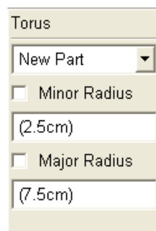


图 3-31　设置对话栏

指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）可以指定圆环的主、次半径。

（3）在圆环圆心单击鼠标左键，然后按住不放并拖动鼠标。

（4）当尺寸满足要求时释放鼠标左键。如果指定了圆环的主、次半径，ADAMS/View 按照设定值创建圆环。

6．创建连杆

ADAMS/View 允许通过指定一条描述连杆长度的直线来创建连杆。默认情况下，ADAMS/View 指定连杆的宽度为长度的 10%，厚度为长度的 5%，端部半径为宽度的一半，也可以设定连杆的长度、宽度和厚度。创建连杆的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择连杆图标

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-32 所示。

指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）可以指定连杆的长度、宽度和厚度。

（3）在起点单击鼠标左键，然后按住不放并拖动鼠标。

（4）当尺寸满足要求时释放鼠标左键。如果指定了连杆的长度、宽度和厚度，ADAMS/View 按照设定值创建连杆。

7．创建平板

平板是具有圆角的拉伸而成的多边形实体。通过定义各拐角的位置来创建平板，至少指定 3 个拐角。ADAMS/View 会在每个拐角位置设置标记点。定义的第一个拐角位置作为一个固定点来定义平板在空间中的位置和方向。默认 情况下，ADAMS/View 设定平板的厚度和拐角半径值为当前长度单位的一个单位，也可以事先指定平板的厚度和拐角处

的圆角半径。创建平板的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择平板图标。

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-33 所示。

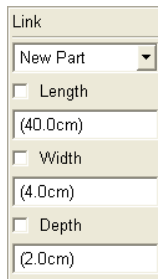


图 3-32　设置对话栏

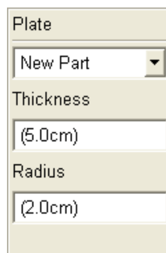


图 3-33　设置对话栏

指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）可以指定平板的厚度或拐角处的圆角半径。

（3）在第一个拐点处单击鼠标左键。

（4）在其他拐点处单击鼠标左键。

（5）拐点定义结束后，单击鼠标右键，结束平板的创建。



提示

如果两相邻拐点间的距离小于拐角半径的 2 倍，ADAMS/View 不能创建此平板。

8．创建拉伸实体

拉伸是通过定义拉伸剖面和拉伸长度而生成几何体的一种方法。要创建拉伸实体，首先要定义拉伸剖面形状，然后沿屏幕或工作栅格的 z 轴方向拉伸剖面。

拉伸前可以作如下设定：

（1）通过选择点创建拉伸剖面时，可以指定其为封闭的或开口的。如果为封闭的剖面，ADAMS/View 拉伸生成一个实体。如果为开口的剖面，ADAMS/View 拉伸生成一个没有质量的壳体。

（2）拉伸的长度。

（3）剖面相对于全局坐标系或工作栅格拉伸的方向。可按下列方式一种进行设置：

1）Forward:沿 z 轴正向拉伸。

2）About Center：沿 z 轴正向和负向分别拉伸，且每个方向的拉伸长度为总拉伸长度的一半。

3）Backward：沿 z 轴负向拉伸。



提示

也可以选择“Along Path”方式拉伸。这种方式可以利用拉伸工具使剖面沿线性几何体拉伸。拉伸后，ADAMS/View 会在截面的每个顶点设置热点（顶点热点），并在定义剖面的第一个点的相反方向处设置热点（反向热点）。顶点热点用来控制剖面的形状，反向热点用来控制拉伸的长度。

根据拉伸剖面的生成方式，拉伸可以分为两种：由已经存在的曲线创建拉伸和通过选择点创建拉伸。

由已经存在的曲线创建拉伸的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择拉伸图标。

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-34 所示。

指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）可以设置拉伸的长度。

3）指定拉伸方向。

（3）选择曲线。

通过选择点创建拉伸的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择拉伸图标。

（2）在设置对话栏，指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）指定是否生成封闭的拉伸。

3）可以设定拉伸长度。

4）指定拉伸方向。

（3）在起点单击鼠标左键。

（4）选取剖面的其他点。

（5）剖面定义结束后单击鼠标右键，结束拉伸的创建。

9．创建旋转体

旋转体是指定旋转剖面和旋转轴，通过剖面的旋转而生成的几何体，旋转剖面不能

是已经存在的基本几何体。ADAMS/View 设定剖面按逆时针（右手定则）绕轴线旋转。旋转剖面可以是开口的，也可以是封闭的。如果选择了封闭的形式，ADAMS/View 会将用一条线段将剖面的起点和终点连接，形成封闭的剖面，并且利用此封闭剖面生成实体旋转体。如果是开口的，ADAMS/View 会创建一个没有质量的壳体。ADAMS/View 会在剖面的每个顶点设置热点，通过这些热点可以改变剖面形状和尺寸。创建旋转体的步骤：

（1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择旋转图标。

（2）系统打开设置对话栏，如图 3-35 所示。

指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）指定是否创建封闭的旋转体。

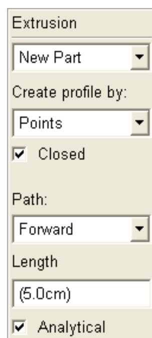


图 3-34　设置对话栏

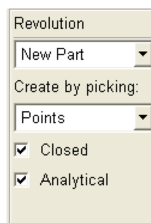


图 3-35 设置对话栏

（3）在屏幕或工作栅格上选择两点，定义旋转轴线。

（4）选择剖面点，用鼠标右键结束剖面点的选取，完成旋转体的创建。



提示

不能使剖面和旋转轴线相交。

3.2.6　创建复杂几何图形

ADAMS/View 提供了许多由简单几何体创建复杂几何体的方法，可以由线框几何图形创建有质量的实体或无质量的形状复杂的开口几何体。创建方法如下：

- 连接线性基本几何图形。
- 拉伸基本几何图形。

- 组合几何体。

1．连接线性基本几何图形

可以将线框几何图形连接成复杂的剖面形状，然后通过拉伸或旋转，创建实体或开口几何体。被连接的几何体必须在端点处相接触，并且不能为封闭几何图形。ADAMS/ View将后选择的几何体连接到先选择的几何体上。

将线性几何图形连接在一起的步骤：

（1）如果还没有几何图形，需要先创建几何图形。

（2）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择连接图标。

（3）选择要连接的线框几何图形。

（4）选择连接几何图形后，单击鼠标右键，结束连接几何体的创建。

下面连接两段曲线：

（1）通过 Spline 命令绘制一段曲线，如图 3-36 所示，弹出信息窗口，该物体无质量，关闭信息窗口。

（2）在第一段曲线的端点处开始绘制第二段曲线，如图 3-37 所示，关闭信息窗口。

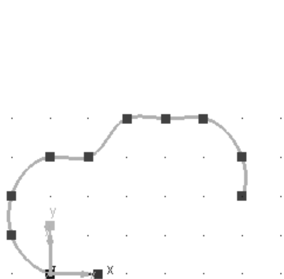


图 3-36　第一段曲线

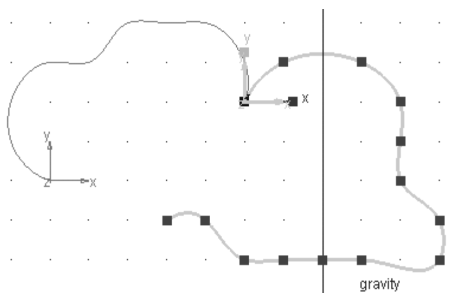


图 3-37　第二段曲线

（3）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择连接图标。

（4）用鼠标左键点击第一段曲线和第二段曲线，选择完毕按鼠标右键，两段曲线连接完毕，如图 3-38，关闭信息窗口。

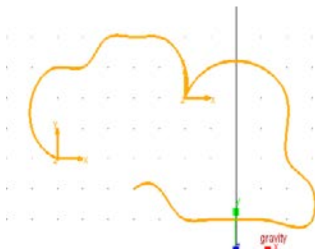


图 3-38　连接后的曲线

2．拉伸基本几何图形

可以将线框几何图形拉伸成具有厚度的三维几何体。可以拉伸直线、多段线、多边形和连接在一起的线框几何图形，但不能拉伸点。如果拉伸的几何图形是封闭的，ADAMS/View 创建具有质量的实体几何体。通过拉伸创建几何体时，要指定拉伸剖面和定义拉伸路径的轨迹线。拉伸基本几何图形的步骤如下：

（1）如果还没有几何图形，需要先创建几何图形。

（2）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择拉伸图标。

（3）在设置对话栏，指定下列参数：

1）选择创建一个新零件（New Part），或者将几何体放置在大地上（On Ground），还是放置到另一个零件上（Add to Part）。

2）选择 Along Path 选项。

（4）选择要拉伸的线框。

（5）选择定义拉伸路径的轨迹线。

3．组合几何体

当创建了单独的零件之后，可以通过 ADAMS/View 提供的布尔运算工具，将他们组合成复杂的实体几何体，如两个零件求和或交。

（1）两个实体零件通过求和创建新零件。ADAMS/View 允许将两个相交的实体连接在一起，从而形成复杂的几何体。ADAMS/View 将后选择的零件并入先选择的零件上，生成新的零件。求和后的质量根据新零件体积进行计算，任何重叠的体积只计算一次。

通过求和布尔运算生成零件的步骤：

1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择求和图标。

2）选择求和的实体，后选择的零件并入先选择的零件上，新生成的零件以先选择的零件名命名。例如先选择的零件为 Part_1，后选择的为 Part_2，求和后的零件名称为 Part_1。

（2）通过两个实体求交创建新零件。可以在 ADAMS/View 中对两个相交的实体求交，求交后生成的新零件为它们的共同部分。默认情况下，ADAMS/View 用后选择的实体与先选择的实体进行求交运算。运算后新生成的零件为先选择实体的一部分，且以先选择的零件名命名。

通过求交布尔运算生成零件的步骤如下：

1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择求交图标。

2）选择要求交的实体。

（3）用一个实体切另一个实体。ADAMS/View 允许用一个实体切掉另一个实体中的相交部分，先选择的实体为被切的实体。新生成的零件以先选择的零件名命名。

用一个实体切另一个实体的步骤如下：

1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择切除图标。

2）先选择被切的实体。

3）选择另一个实体。



提示

● 当一个小零件完全被包在一个大零件里时，不能用大的零件来切小的零件。

● 如果用一个实体切完另一个实体后，另一个实体变成了两部分，则这种操作也不允许。

（4）重生成求交或切割前的各零件。这个操作就是将经过求交或切割操作的零件，重生成求交或切割前的各零件，操作步骤如下：

1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择图标。

2）选择实体。

（5）合并几何体。ADAMS/View 允许不经过任何布尔运算将两个不相交的实体合并成一个实体。几何体包括任何类型的几何实体、线框图形或复杂图形，也可以属于同一零件。如果几何体属于不同的零件，ADAMS/View 会将他们合并成一个。由于不执行布尔操作，所以重合的体积的质量为两部分的和，因此这个命令只能对不相交的实体进行，不相交的实体不能用布尔运算中的求和命令。ADAMS/View 将后选择的几何体合并到先选择的几何体上。合并几何体的步骤如下：

1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择合并图标。

2）选择要合并的几何体。

4．添加几何体细节特征

可以在创建的几何实体上加一些特征。这些特征包括倒角、倒圆角、打孔和长凸台和抽壳。下面详细介绍这些特征的创建方法。

（1）几何体的倒直角和倒圆角。可以将创建的模型的边和拐角边进行倒直角和倒圆角。倒直角时，要指定倒角的宽度；倒圆角时，可以创建等半径的圆角，还可以指定起始半径和终止半径来创建可变半径的圆角。ADAMS/View 先创建可变半径圆角的起始半径，然后圆角半径逐渐增大或减小，直到终止半径。



提示

一次只对一个边进行倒直角或圆角和一次对多个边进行倒直角或圆角所得的结果可能会不同。甚至如果相邻的边已经进行了倒直角或圆角，对这个边进行倒直角或圆角时，可能会失败，这取决于倒直角或圆角的复杂程度。

倒直角和倒圆角的步骤如下：

1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择下列图标：

- 倒直角时，选择图标。
- 倒圆角时，选择图标。

2）在设置对话栏指定下列参数：

- 在第一步选择了创建倒直角时，设置直角的宽度。
- 在第一步选择了创建倒圆角时，设置圆角的半径。也可以创建可变半径圆角。选中 End Radius 选项，并设置圆角终止半径。ADAMS/View 用 Radius 项中设置的半径为起始半径。

3)选择边或顶点。当选择边时，将所选边进行相应的倒角；当选择顶点时，ADAMS/View 会将与所选顶点相连的边全部进行倒角。

4）单击鼠标右键结束倒角的创建。

下面对一个立方体进行倒直角和圆角：

1）在主工具箱中选择立方体图标。

2）绘制一立方体，如图 3-39 所示。

3）在主工具箱中按透视角度按钮，显示立方体，如图 3-40 所示。

4）在工具箱中选择倒直角按钮。

5）设置倒角宽度为 2.0cm。

6）选择立方体上欲倒角的边，如图 3-41 所示。

7）选择完毕按鼠标右键，完成倒角，如图 3-42 所示。

8）在工具箱中选择倒圆角按钮。

9）设置圆角半径为 2.0cm。

10）选择立方体上欲倒圆角的边。

11）选择完毕按鼠标右键。

12）在主工具箱中按透视角度按钮，查看立方体圆角效果，如图 3-43 所示。

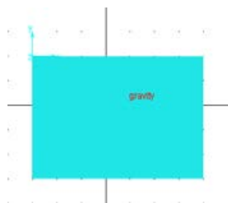


图 3-39　绘制立方体



图 3-40　观看立方体

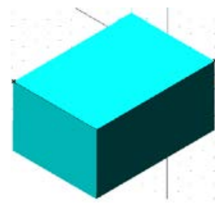


图 3-41　选择倒角所在的边

（2）在实体上打孔或生成凸台。利用打孔按钮和凸台按钮可以在实体上创建圆孔和在实体表面上创建凸台。

打孔和生成凸台的步骤如下：

1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择下列图标。

- 打孔时，选择打孔图标。
- 创建凸台时，选择凸台图标。

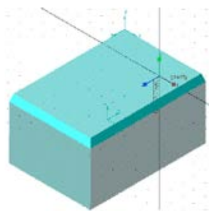


图 3-42　完成倒角

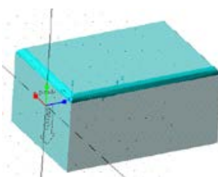


图 3-43　完成圆角

2）在设置对话栏指定下列参数：

- 在第一步选择了创建打孔特征时，设置孔的半径和深度。
- 在第一步选择了创建凸台特征时，设置凸台的半径和高度。

3）选择孔或凸台放置的面。

4）选择孔或凸台的中心位置。



提示

为了对孔或凸台进行精确定位，可以在创建孔或凸台之前先在希望的位置创建标记点，然后在第 4 步时选择标记点。也可以创建完后对孔或凸台进行修改。

下面对一立方体进行挖孔和生成凸台操作：

1）在主工具箱中选择立方体图标，绘制一立方体。

2）选择打孔图标，系统打开设置对话栏，设置圆孔半径为 5.0cm，深度为 5.0cm，如 3-44 所示。

3）选择立方体并选择打孔所在的面，选择完毕在立方体上打出一孔，如图 3-45 所示。

4）选择凸台图标，系统打开设置对话栏，设置圆半径为 5.0cm，高度为 5.0cm，如图 3-46 所示。

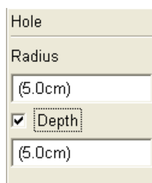


图 3-44　设置对话栏

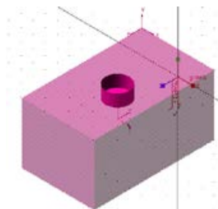


图 3-45　打孔

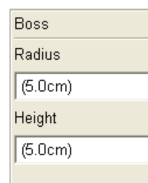


图 3-46　设置对话栏

5）选择立方体，以及放置凸台的平面，如图 3-47 所示。

（3）挖空实体。可以将实体的一个或多个平面挖空，从而形成壳体。挖空实体时，要指定剩余壳体的厚度和被挖空的面。也可以指定在实体的外边加材料，在这种情况下 ADAMS/View 把原始实体作为一个模具，往原始实体上加指定厚度的材料，然后将原始实体删除，剩下壳体。

挖空实体的步骤如下：

1）在主工具箱中的几何建模工具集中，选择挖空实体图标。

2）系统打开设置对话栏，如图 3-48 所示。

指定下列参数：

- 设置剩余壳的厚度。
- 选择挖空的方式。选中 Inside 时，将实体内部挖空。

3）选择要挖空的实体。

4）选择要挖空的平面。

5）单击鼠标右键结束操作。

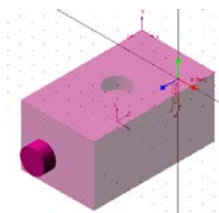


图 3-47　凸台

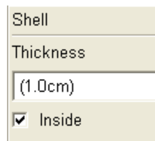


图 3-48　设置对话栏

3.2.7　创建柔性梁

柔性梁有两种形式，ADAMS/View 中可以创建的离散梁和由有限元软件计算后导入的柔性体，这里只介绍在 ADAMS/View 中如何创建离散梁。离散梁由两个或多个刚体组成，刚体间通过梁力单元连接。

创建一个离散梁需要指定下列参数：

- 梁的端点。
- 刚体的个数和材料特性。
- 梁的特性。
- 梁端部的连接方式（柔性、刚性或自由连接）。

（1）柔性梁的种类：为了方便创建离散的柔性梁，ADAMS/View 提供了一系列的几何形状作为梁的截面形状。也可以输入面积和惯性特性来定义梁的截面，如图 3-49 所示。

预定义的几何截面形状包括：实心矩形、实心圆、空心矩形、空心圆和 I 形梁。

ADAMS/View 用截面形状来计算下列各量：

1）梁的面积和面积矩（Ixx，Iyy，Izz）

2）质量、惯性质量和刚体的质心标记点。

（2）柔性梁的定位：ADAMS/View 用两个或三个标记点来定义离散梁的位置和方向，即两个标记点和方向标记点。方向标记点只取决于截面几何形状的类型，两个标记点确定了柔性梁的长度和梁力单元的 X 轴方向。

创建柔性梁的步骤如下：

1）在菜单栏选择 Build，指向 Flexible Bodies，然后选择 Discrete Flexible Link，会出现如图 3-50 所示的柔性梁建立对话框。

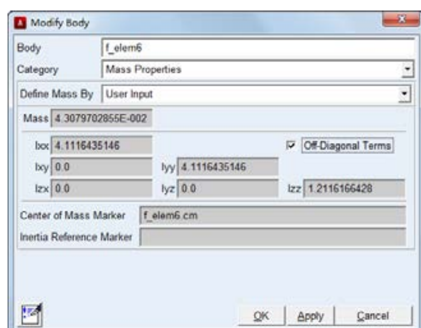


图 3-49　设置参数对话框

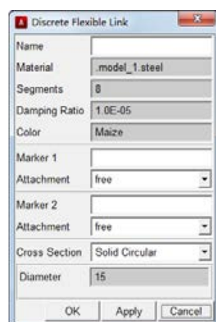


图 3-50　柔性梁建立对话框

2）定义连杆名称、材料特性、刚体数、阻尼率和柔性梁的参数。

3）选择柔性梁的端点标记点和端点连接方式。

4）选择或定义梁的截面形状。

3.2.8　修改几何体

完成几何体的创建后，ADAMS/View 仍然允许对其几何形状和位置等进行修改。在 ADAMS/View 中修改几何形体有 3 种方法：拖动热点、利用对话框和表格编辑器。

1．拖动热点

完成几何体的建模后，ADAMS/View 会在所绘几何图形上设置若干热点。热点以实心的正方形为标志，当选中几何体时，热点会高亮显示。拖动这些热点，可以修改几何体的形状，如图 3-51 所示。

2．利用对话框

如果需要精确修改几何体，可以利用弹出式对话框输入尺寸，方法如下：

（1）将鼠标移到要修改的几何体上，单击鼠标右键激发出弹出式菜单，选择需要修改的几何体对象。在弹出式菜单中列出了鼠标附近的全部对象列表，所显示的对象按数

据库结构排列，对于构件（Part），一般首先列出构件的名称，然后在构件的下方，列出属于该构件的对象，包括几何体、坐标标记等。例如对于名称为 Part_2 的构件的矩形块 Box_1，可以在弹出式菜单的对象列表中选择位于 Part_2 下面的矩形块 Box_1。

（2）在下一层的弹出式菜单中，选择 Modify 命令，显示对象的修改对话框，如图 3-52 所示为矩形块的修改对话框。

（3）根据修改对话框的提示修改或输入有关参数。如对矩形块可以输入或修改矩形块的名称、注释、标记点以及矩形的长、宽和高。

（4）选择 OK 按钮，完成修改。

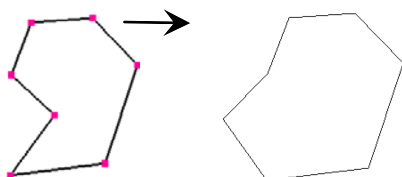


图 3-51　拖动热点修改几何形体

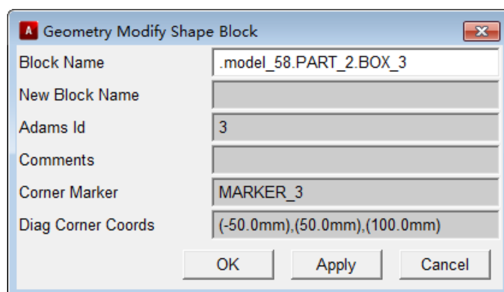


图 3-52　矩形块修改对话框

3．表格编辑器

通过表格编辑器可以非常方便地修改构件、标记点、关键点、铰、驱动和参变量。选择菜单栏中的 Tools 命令，指向 Table Editor，可以显示如图 3-53 所示的表格编辑器。在表格编辑器的下面可以选择编辑对象的类型。选中不同的类型，表格将显示相关的项目。其操作方法如下：

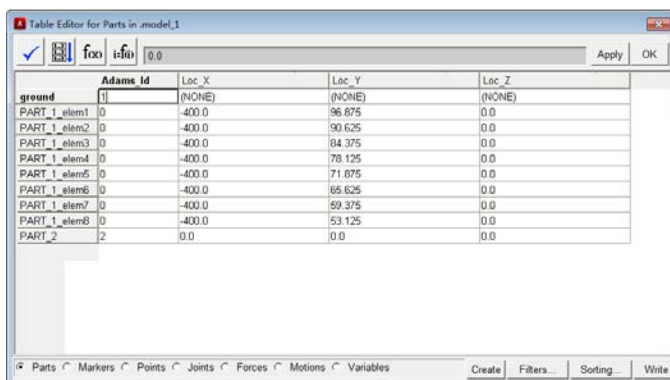


图 3-53　表格编辑器

（1）用鼠标选择表格中的单元，可以输入或修改单元值。

（2）用 Tab、Shift+Tab、↑、↓键可以分别向后、向前、向上、向下移动所选单元。

（3）按住 Shift 或 Ctrl 键，拖动鼠标可以同时选择多个单元。

（4）选择行或列的标题，可以选择一行或一列。

（5）在选择的单元中，单击鼠标右键显示弹出式菜单，可以从中选择剪切、复制和粘贴单元值的命令。

（6）如果希望在多个单元内同时输入某个相同的值，将单元选中，然后在输入框中输入参数值，最后选择图标。

在表格编辑器的下面还有一些很有用的按钮，其功能如下：

- Create 按钮：在当前表格中创建新的项。
- Filters 按钮：确定表格显示项目的范围。可以选择显示整个模型、某个构件等的相关项目。
- Sorting 按钮：设置将表格中项目的分类方式。单击弹出分类方式设置对话框。
- Write 按钮：将表格中的位置数据输出到一个 ASCII 文件中。
- Reload 按钮：重新加载文件。

3.2.9 修改构件特性

（1）构件特性修改对话框：除了构件的几何形状外，进行仿真分析时所需的构件特性还包括：质量、转动惯量和惯性积、初始速度、初始位置和方向等，这些特性往往在分析中比几何形状更加重要。ADAMS/View 几何建模时，程序根据设置的默认值自动确定构件的有关特性，如果需要修改构件特性，可以通过构件特性修改对话框进行，如图 3-54 所示。有两种方式进入构件特性修改对话框：

1）在要修改的构件上单击鼠标右键，激发弹出式菜单，选择需修改的构件（Part），再选择下级菜单中的 Modify 命令。

2）在菜单栏中选择 Edit 菜单中的 Modify 命令。如果选择 Modify 命令时已经选择了构件，程序将直接显示该构件的特性修改对话框。否则程序将显示数据库浏览器，可以在数据库浏览器中选择修改的对象。

（2）修改构件质量、转动惯量和惯性积：在几何建模时，ADAMS/View 自动计算构件的体积，并根据体积和材料的密度自动计算出构件的质量、转动惯量和惯性积。

ADAMS/View 提供了 3 种修改构件质量和惯性矩的方法：

1）选择 Geometry and Material Type 选项。此时程序要求输入构件材料的名称，ADAMS/View 根据输入的材料名称，自动到材料数据库中查找该材料的密度，然后根据材料的密度和几何形状，计算质量和惯性矩。可以在材料输入栏显示弹出式菜单，从中选择 Material，然后再选择 Browse 命令，显示材料数据库浏览器，从中选择材料。

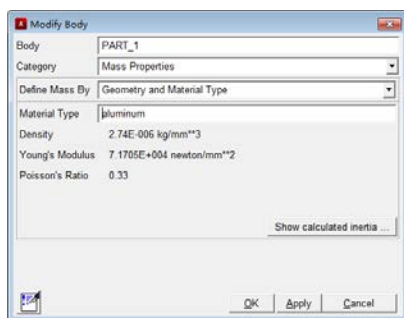


图 3-54　构件特性设置对话框

2）选择 Geometry and Density 选项。此时程序要求输入材料密度，ADAMS/View 根据输入的密度和构件的几何形状计算质量和惯性矩。

3）选择 User Input 选项。此时输入构件的质量和惯性矩。

当选择 User Input 选项时，除了要输入构件的质量和惯性矩外，还要求输入构件的质心标记点和惯性参考标记点。惯性参考标记点定义了计算惯性矩时的参考坐标。如果不输入惯性参考标记点，ADAMS/View 将使用质心标记点作为构件的惯性参考标记点。

应该注意不能将构件的质量设置为零，零质量的可运动构件将导致分析失败，因为根据牛顿定律公式 $a = F / m$，零质量将导致无穷大的加速度。因此，建议为所有的运动构件设置一定的质量和惯性矩，可以设置为一个非常小的值。

参数设置好后，选择 Show calculated inertia 按钮，可以显示根据设定参数计算的质量和惯性矩的结果。

（3）修改初始速度：几何建模时，ADAMS/View 根据相邻构件的情况，自动计算出构件的初始速度，如果不满足要求可以进行修改。

在构件特性修改对话框中选择 Velocity Initial Conditions 选项，显示初始速度设置对话框，如图 3-55 所示。根据对话框中的各项提示，设置构件的初始线速度和初始角速度。

初始线速度和初始角速度设置包括 3 项内容：参考坐标系、方向和速度值。

这里定义的初始线速度为构件质心的速度，定义的初始角速度为对于质心标记坐标的旋转速度。

（4）修改初始位置和方向：在构件特性修改对话框中选择 Position Initial Conditions 选项，显示初始位置和方向设置对话框，如图 3-56 所示。根据对话框中的各项提示，设置构件的初始位置和方向。

（5）设置材料：ADAMS/View 有一个材料库包括了常用材料。库中数据包括了材料的摩擦系数、弹性模量、泊松比和密度等。在默认状态下，构件材料设置为钢。可以在材料库中选择其他材料，也可以自行输入材料的特性。

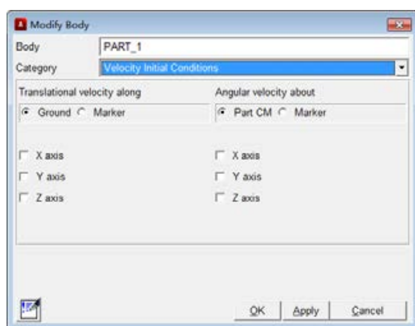


图 3-55　初始速度设置对话框

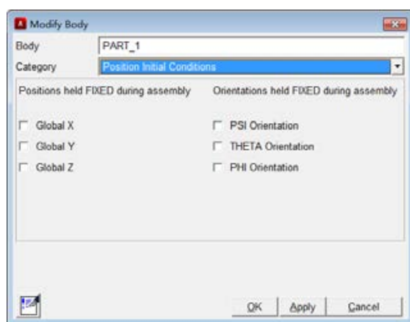


图 3-56　初始位置和方向设置对话框

建立或设置材料物理特性的方法如下：

1）在菜单栏中选择 Build 菜单中的 Materials 命令，然后选择 New 或 Modify 命令。

2）如果选择了 Modify 命令，弹出材料库列表，从中选择需要修改的材料，修改材料的名称、杨氏模量、泊松比和密度，如图 3-57 所示。如果选择了 New 命令，弹出定义新材料对话框，设置材料的名称、杨氏模量、泊松比和密度，如图 3-58 所示。

3）单击 OK 按钮，完成材料的修改或创建。

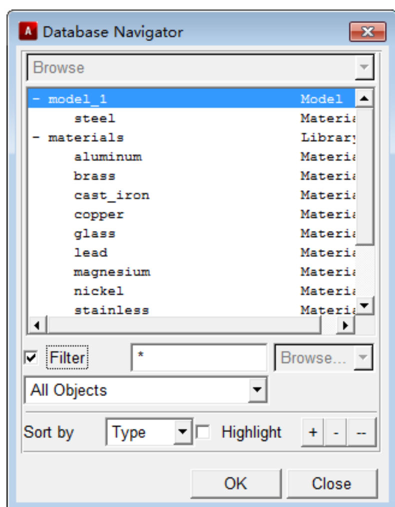


图 3-57　材料库列表对话框

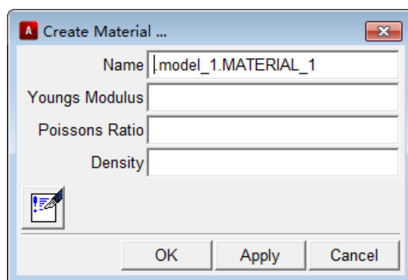


图 3-58　定义新材料对话框

3.3　实例——小球碰撞

本例是一个空间曲柄滑块机构推动小球使之与球瓶发生碰撞的情况，包含的物体包括平台、曲柄、连杆、滑块、小球和球瓶，如图 3-59 所示。该模型文件为 Bin 格式，文件名为 glo_example，在本书附带光盘的 yuanwenjian\ch_02\example 目录下，下面介绍建模的操作过程。

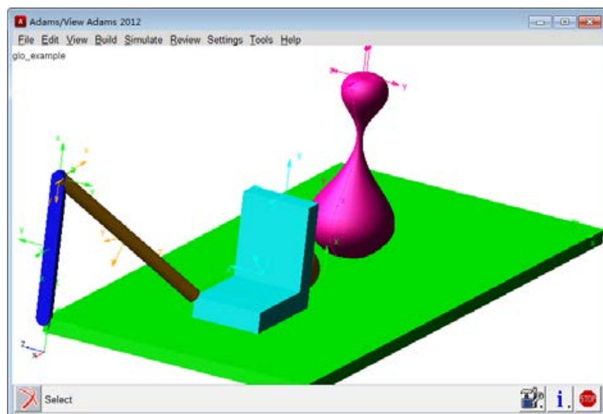


图 3-59 模型的组成

3.3.1 平台建模

在本例中，用以作为机架的平台是一个立方体，其建模过程如下：

（1）设置工作栅格间距。为了交互式建模自动捕捉数据更准确，将 ADAMS 工作栅格的 *x* 和 *y* 方向间距从默认值“50mm”改为“10mm”，如图 3-60 所示。

（2）在主工具箱中右击（几何建模）工具集按钮，展开所有的几何建模工具（Rigid Body）按钮，单击（立方体建模）按钮，弹出“Geometric Modeling”对话框，在该对话框的下半部分会出现是否指定立方体长宽高的 3 个数据编辑框，勾选“Depth”复选框，输入“40.0cm”，将立方体的宽度定为 40.0cm，如图 3-61 所示。

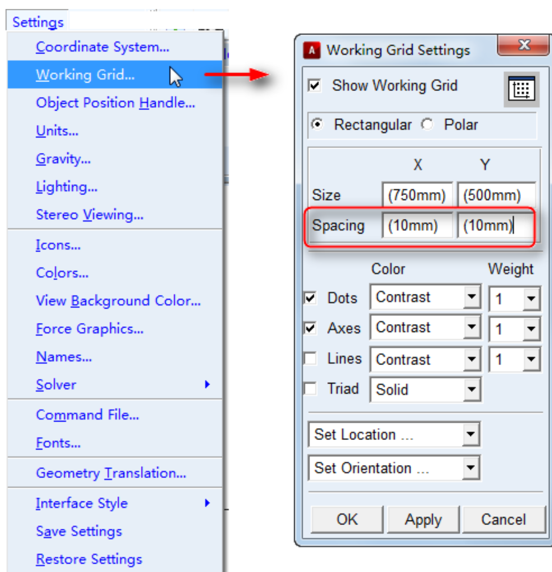


图 3-60 设置工作栅格间距

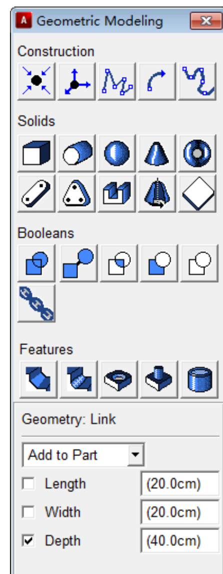


图 3-61 设定立方体参数

（3）单击菜单栏中的“View”→“Coordinates Window”命令打开坐标窗口，然后在图形区的栅格坐标为（−650，0，0）的点附近右击，出现坐标输入窗口，在其中输入坐标（−650.0，0.0，−200.0），单击“Apply”按钮确定立方体左角点。继续在图形区的栅格坐标为（300，−20，0）的点附近右击，输入坐标（300.0，−20.0，−200.0），单击“Apply”按钮确定立方体右角点并创建立方体模型，如图 3-62 所示。在本例中，此立方体模型将作为机构支撑平台使用。

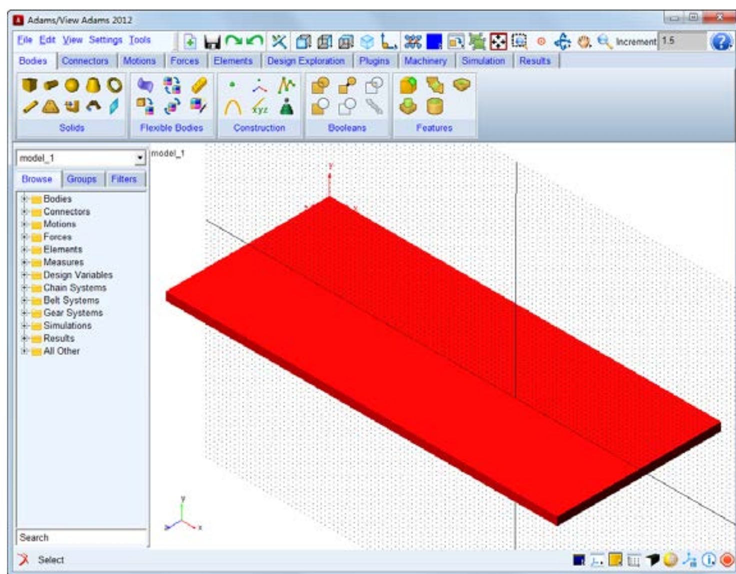


图 3-62　平台模型

3.3.2　小球建模

（1）在主工具箱中右击（几何建模）工具集按钮，展开所有的几何建模工具按钮，单击（球体建模）按钮，然后在图形区栅格坐标为（−70，30，0）处按住鼠标左键并拖动至坐标（−70，0，0）处松开，创建的小球模型如图 3-63 所示。

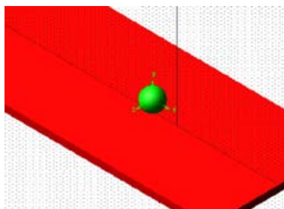


图 3-63　小球模型

（2）调整小球质量。在 ADAMS/View 中，默认情况下物体的质量是根据物体几何实体的体积计算出来的，物质密度在默认情况下采用钢材的密度，但有时为了仿真计算的需要，也可以人为指定物体的质量。

在本例中，调整小球质量至 5.0kg，具体操作步骤是，先将光标移至小球位置右击，在弹出的右键菜单中单击“Part：PART_2”→“Modify”命令，弹出“Modify Body”对话框，在“Define Mass By”下拉列表中选择“User Input”选项，然后在“Mass”文本框中输入“5.0”，单击“OK”按钮，完成对小球质量的修改，如图 3-64 所示。

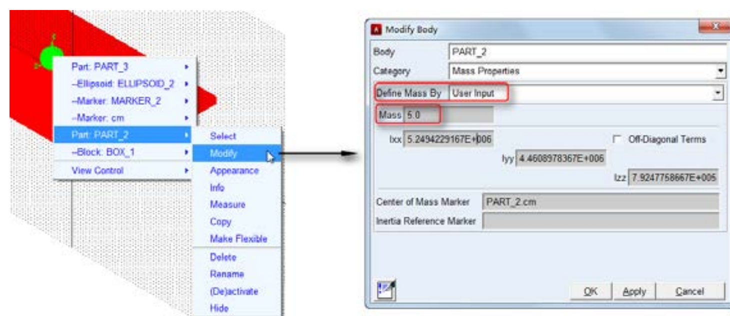


图 3-64　修改小球质量

3.3.3　滑块建模

在本例中，滑块作为一个拉伸体，其建模过程如下：

（1）在主工具箱中右击（几何建模）工具集按钮，展开所有的几何建模工具按钮，单击（拉伸建模）按钮，在弹出的“Geometric Modeling”对话框中勾选“Closed”复选框，将“Path”设置为“About Center”，以确保所完成的拉伸体位置是关于工作栅格平面对称的，在“Length”文本框中输入“10.0cm”，用来确定拉伸体的厚度。

（2）完成以上设置后，在绘图区栅格上依次点取坐标点（0，150，0）、（30，150，0）、（30，30，0）、（150，30，0）、（150，0，0）、（0，0，0）。点取完最后一个点后右击，ADAMS/View 将自动完成拉伸体的建模，如图 3-65 所示。

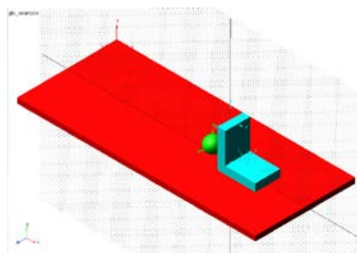


图 3-65　滑块建模

3.3.4　球瓶建模

在本例中，球瓶是由曲多边形旋转而成的复杂实体，其相应的曲多边形是由一段样条曲线（Spline）和一段折线（Polyline）组成的封闭多边形，其建模过程如下：

（1）创建样条曲线。在主工具箱中右击（几何建模）工具集按钮，展开所有的几

何建模工具按钮，单击（样条曲线建模）按钮，在弹出的“Geometric Modeling”对话框中取消对“Closed”复选框的勾选，然后依次点取坐标点（−250，250，0）、（−240，250，0）、（−230，240，0）、（−240，200，0）、（−230，100，0）、（−200，50，0）、（−230，0，0）。点取完最后一个坐标点后右击，结束创建样条曲线。ADAMS/View 创建的样条曲线如图 3-66 所示。这时 ADAMS 会弹出消息窗口给出警告，提示所创建的物体不具有质量，关闭消息窗口忽略警告。

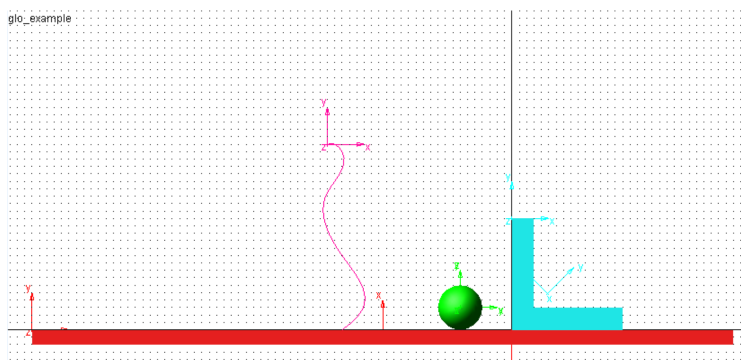


图 3-66　创建的样条曲线

（2）创建折线段。在主工具箱中右击（几何建模）工具集按钮，展开所有的几何建模工具按钮，单击（折线段建模）按钮，在弹出的对话框中取消对“Closed”复选框的勾选，一定注意选择“Add to Part”以确保折线段和样条曲线属于同一个物体。完成以上设置后，将光标移到绘图区，这时窗口下的提示栏提示选择一个“body”，将光标移动到样条曲线上，单击选择与样条曲线相同的“body”（PART_5），然后依次点取坐标点（-250，250，0）、（-260，250，0）、（-260，0，0）、（-230，0，0）。点取完最后一个坐标点后右击，结束创建样条曲线，ADAMS/View 创建的折线段如图 3-67 所示。这时 ADAMS 也会弹出消息窗口给出警告，提示所创建的物体不具有质量，关闭消息窗口忽略警告。

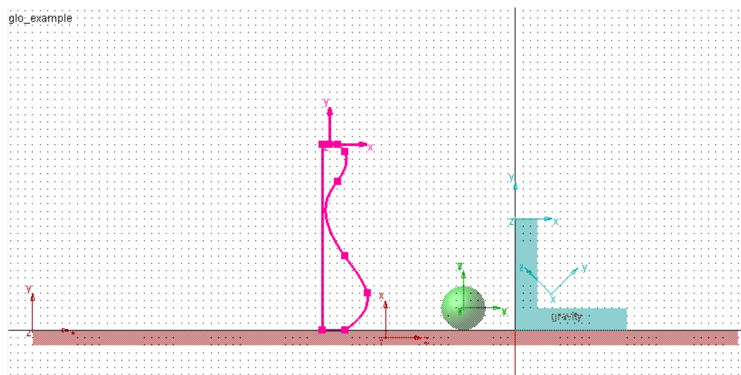


图 3-67　创建折线段

（3）创建旋转坐标。球瓶是一个旋转体，必须为其创建一个旋转坐标。为此，在主

工具箱中右击（几何建模）工具集按钮，展开所有的几何建模工具按钮，单击（Marker点）按钮，并在弹出的对话框中选择“Add to Part”选项和“Z_Axis”选项，即创建坐标系时指定 z 轴方向。完成以上设置后，在绘图区选择曲边多边形所在物体（PART_5），在坐标点（-260，250，0）处创建旋转坐标，坐标 z 轴方向竖直向上，如图 3-68 所示。

（4）生成旋转体。球瓶由曲多边形绕上面坐标系的 z 轴旋转而成，具体创建过程如下：

单击菜单栏中的“Tools”→“Command Navigator”命令，弹出“Command Navigator”对话框，如图 3-69 所示。单击“geometry/creat/shape”前的“+”，展开命令集，双击“revolution”命令，弹出图 3-70 所示的“Geometry Create Shape Revolution”对话框。在“Reference Marker”文本框中右击，在弹出的右键菜单中单击“Marker”→“Pick”命令，在绘图区单击旋转坐标，在“Profile Curve”后面的文本框中右击，在弹出的右键菜单中单击“Wire_Geometry”→“Pick”命令，在绘图区选择样条曲线和折线段，在“Relative To”文本框中右击，在弹出的右键菜单中单击“Reference Frame”→“Pick”命令，在绘图区单击旋转坐标。完成以上操作后，单击“OK”按钮，ADAMS 自动生成球瓶旋转体，如图 3-71 所示。

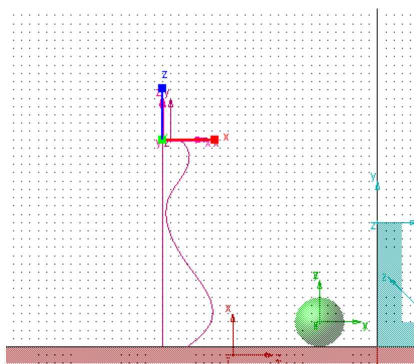


图 3-68　创建的旋转坐标

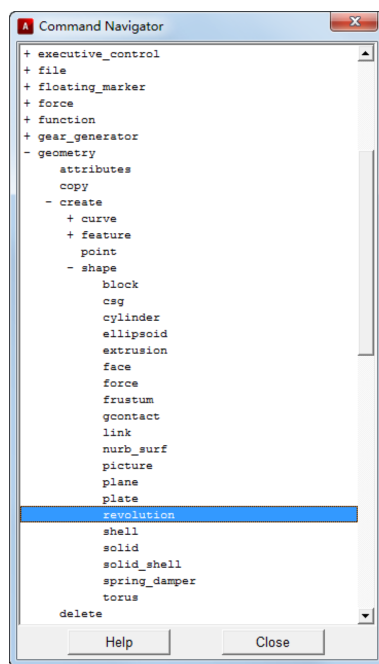


图 3-69　“Command Navigator”对话框

（5）调整球瓶位置。在本例中，要想使小球和球瓶之间发生斜碰，需要将球瓶沿 z 轴正向移动 2cm。在绘图区空白处右击，在弹出的右键菜单中单击“Right<R>”命令，将视图转换为右视图，在球瓶上单击选中它，然后在主工具箱中单击（移动）按钮，在“Distance”文本框中输入 2cm，单击（向左移动）按钮，将球瓶向左（z 轴正向）移动 2cm，如图 3-72 所示。

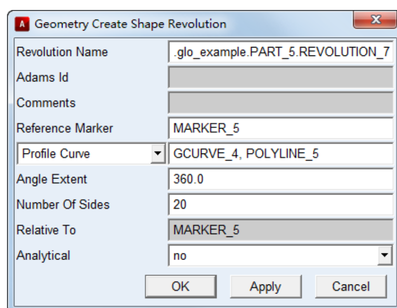


图 3-70　“Geometry Create Shape Revolution”对话框

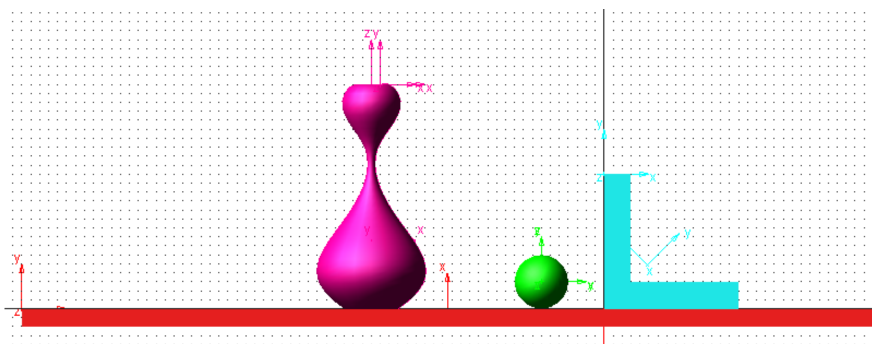


图 3-71　生成球瓶旋转体

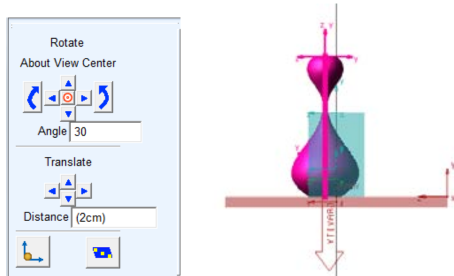


图 3-72　球瓶移动后的位置

3.3.5　曲柄建模

（1）调整工作栅格方位。本例的曲柄滑块机构是一个空间机构，曲柄转动平面与滑块滑动方向垂直，也与当前工作栅格平面垂直。为了方便交互式建模，必须先改变工作栅格方位。为此，首先将视图还原为前视图（Front<F>），单击菜单栏中的“Settings”→“Working Grid”命令，弹出“Working Grid Settings”对话框，在对话框下部有两个选项栏，分别用于设定工作栅格原点位置和栅格平面方位，调整栅格原点到坐标点（300，

0，200）处，调整方向到全局坐标的 *yz* 平面，如图 3-73 所示。

（2）创建曲柄。将视图转换为右视图（Right<R>），单击主工具箱中的（创建连杆）按钮，然后在绘图区的栅格原点按住鼠标左键并拖动至坐标点（0，200，0）处松开，创建的曲柄如图 3-74 所示。

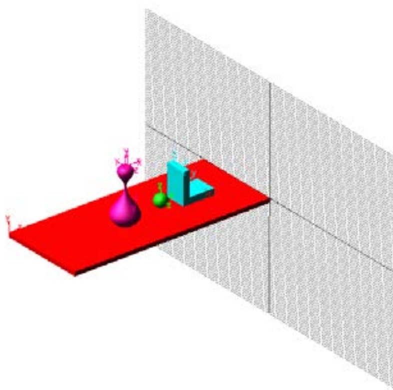


图 3-73　调整后的工作栅格位置

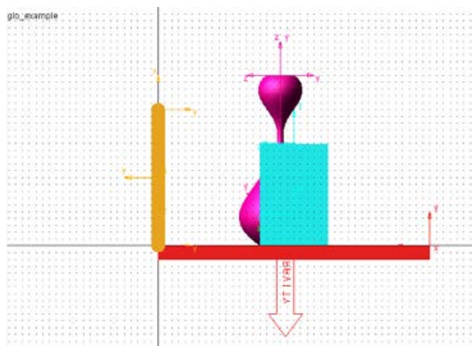


图 3-74　创建的曲柄

3.3.6　连杆建模

适当调整视图方位到图 3-73 所示的位置，在主工具箱中右击（几何建模）工具集按钮，展开所有的几何建模工具按钮，单击（圆柱体建模）按钮，在弹出的“Geometric Modeling”对话框中勾选“Radius”复选框，并输入半径值“1.0cm”，然后在绘图区中点取曲柄上端的坐标点按住鼠标左键并拖动至滑块的角点处第二次单击，完成连杆（圆柱体）的建模，如图 3-75 所示。

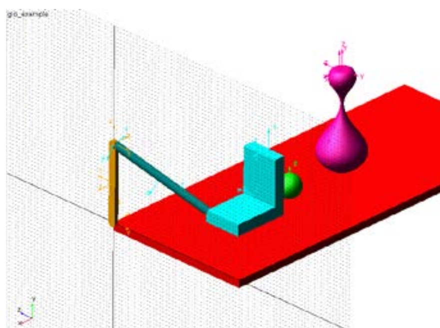


图 3-75　创建的连杆

至此，本例所包含的物体全部创建完成，每个物体各自的几何和物理信息都被储存到数据库中，但物体之间是彼此分离的，还必须建立相互的约束关系，才能构成一个完整的机构。

第 4 章

创建约束

本章详细讲解了 ADAMS 环境中物理模型约束构件的类型、自由度、命名以及常用的约束工具，并介绍了虚约束和创建高副，以及如何定义机构的运动，最后通过实例进行说明。

学习要点

- 约束类型、约束和自由度、约束的命名、约束工具
- 常用约束、虚约束
- 创建高副
- 定义机构运动

4.1 约束类型

ADAMS/View 中约束定义了构件（刚体、柔性体和点质量）间的连接方式和相对运动方式。ADAMS/View 为用户提供了一个非常丰富的约束库，主要包括以下 4 种类型的约束：

（1）理想约束。包括转动副、移动副和圆柱副等。

（2）虚约束。限制构件某个运动方向，例如约束一个构件始终平行于另一个构件运动。

（3）运动产生器。驱动构件以某种方式运动。

（4）接触限制。定义两构件在运动中发生接触时，是怎样相互约束的。

4.2 约束和自由度

构件独立运动的数目称为自由度。一个空间自由体有 6 个自由度——3 个转动自由度和 3 个移动自由度。每个自由度至少对应一个运动方程。当在两个零件间施加约束后，约束消除了零件的某些自由度。无论零件受力如何和如何运动，一个零件始终和另一个零件保持一定的位置关系。

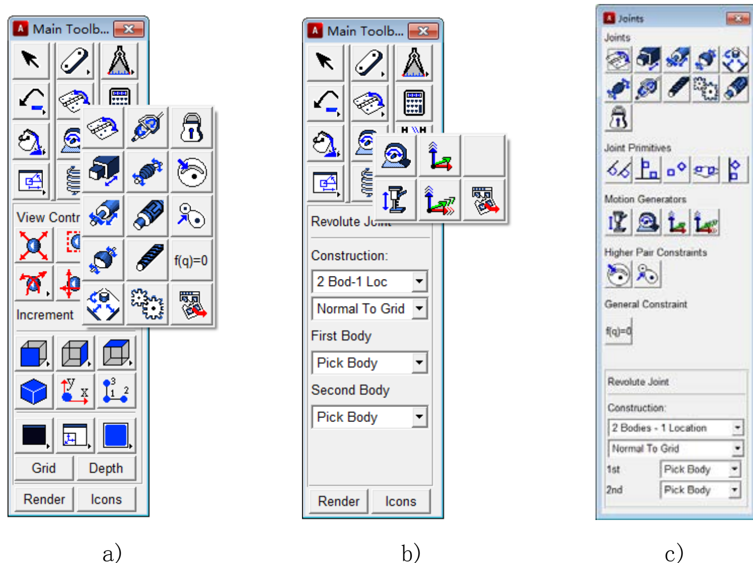
ADAMS/View 中不同的约束去除不同的自由度。例如，一个转动副消除了两个零件间的 3 个移动自由度和 2 个转动自由度。模型的总自由度数等于所有活动构件的自由度的和与所有运动副引入约束数目和的差。当进行模型仿真分析时，ADAMS/Solver 计算模型的总自由度，并确定求解模型的代数方程。用户也可以在仿真前通过模型分析工具计算模型自由度。

4.3 约束的命名

创建约束时，ADAMS/View 根据约束的类型和当前模型中这类约束的数量，自动为约束生成一个名字。对于理想约束以“JOINT”加下划线“_”加约束号命名(例如，JOINT _1)；对于虚约束以“PRIM”加下划线“_”加约束号命名（例如，PRIM _1）。

4.4 约束工具

ADAMS/View 中允许通过两种方式启动约束工具，一种是在主工具箱中，选择连接工具集图标或运动工具集图标，如图 4-1a、b 所示，然后选择约束工具。另一种方法是在菜单栏中的 Build 菜单中选择 Joints 项，可显示约束浮动窗口，如图 4-1c 所示。



a)　　b)　　c)

图 4-1　约束工具集

主工具箱中的连接和运动工具集中包含大部分常用约束命令，而由 Build 菜单中的 Joints 项弹出的约束浮动窗口包含所有约束命令。

4.5 常用约束

4.5.1　常用理想约束

ADAMS/View 为用户提供了 12 个常用的理想约束工具，如表 4-1 所示。表中列出了约束的工具图标和约束的自由度数。通过这些运动副，可以将两个构件连接起来，约束它们的相对运动。被连接的构件可以是刚性构件、柔性构件或者是点质量。

对于表 4-1 中序号 1～10 的约束，施加的方法如下：

（1）在图 4-1a 所示主工具箱中的连接工具集，或在约束浮动窗口，选择约束工具图标。

（2）在设置栏选择连接构件的方法，一共有 3 种方式：

- 1 个位置（1Location）。选择一个连接位置，由 ADAMS/View 确定连接的构件，此时 ADAMS/View 自动选择最靠近所选连接位置的构件进行连接，如果所选连接点附近只有一个构件，则该构件将同地面连接。只有在两个构件的连接位置非常接近时，才可以由 ADAMS/View 确定连接构件，而且由 ADAMS/View 确定连接的构件时，ADAMS/ View 并不区分第一个构件与第二个构件。因此对于要求明确指出第一个构件与第二个构件的约束，这种方法不适用。

表 4-1 常用的运动副工具

1. 旋转副	2. 移动副	3. 圆柱副
约束 2 个旋转和 3 个移动自由度	约束 3 个旋转和 2 个移动自由度	约束 2 个旋转和 2 个移动自由度
4. 球副	5. 平面副	6. 等速度副
约束 3 个移动自由度	约束 2 个旋转和 1 个移动自由度	约束 1 个旋转和 3 个移动自由度
7. 虎克铰	8. 万向副	9. 螺旋副
约束 1 个旋转和 3 个移动自由度	约束 1 个旋转和 3 个移动自由度	约束 2 个旋转和 2 个移动自由度
10. 齿轮副	11. 耦合副	12. 固定副

- 两个构件 1 个位置（2Bod—1 Loc）。选择需连接的两个构件和一个连接位置，此时约束固定在第一个构件上（即先选择的构件），第一个构件相对于第二个构件运动。
- 两个构件两个位置（2Bod—2 Loc）。选择需连接的两个构件，以及两个构件上的约束连接位置。

（3）选择连接方向。连接方向决定了构件间相对运动的轴线方向，有两种选择方法：

- 垂直栅格平面（Normal to Grid）。当工作栅格显示时，约束方向垂直于栅格平面。否则约束方向垂直于屏幕。
- 选择约束方向（Pick Feature）。通过选择一个在栅格平面或屏幕内的方向矢量确定约束的方向。

（4）根据状态栏提示，依次选择相互连接的构件 1、构件 2、连接位置和约束方向。

4.5.2　施加螺旋副

螺旋副使一个构件绕着另一个构件旋转，并沿其轴线移动。螺旋副不要求两个构件相对旋转和移动的轴线平行，但要求第一个构件上标记点的 z 轴和第二个构件上标记点的 z 轴始终平行和同向。创建螺旋副后，要求指定螺距值。它定义了第一个构件绕着第二个构件每旋转一周第一个构件位移的大小。默认情况下，ADAMS/View 将螺距值设为 1，单位为长度单位。输入正的螺距值，表示螺旋副为右旋，负值表示左旋。

4.5.3　施加齿轮副

齿轮副由两个齿轮、一个连接支架和两个约束组成，如图 4-2 所示。齿轮副通过一个公共速度标记点建立起了 3 个构件和两个约束之间的运动关系。

公共速度标记点在支架上，为两齿轮接触点，它的 z 轴方向定义了齿轮啮合点的速度和啮合力的方向。公共速度标记点到两个约束的距离决定了齿轮的传动比。

齿轮副中的约束可以为旋转副、移动副或圆柱副，可以选择不同类型的连接，模拟不同的齿轮连接形式，如直齿圆柱齿轮、斜齿轮、行星齿轮、锥齿轮、齿条齿轮等。

创建齿轮副的方法如下：

（1）创建两个构件作为齿轮，并在齿轮上施加约束。

（2）在主工具箱中的几何建模工具集中选择标记点图标，作为公共速度标记点。注意：公共速度标记点应建在连接支架上，并且标记点的 z 轴方向应该指向齿轮副啮合点的运动方向。

（3）在主工具箱中的约束工具集中选择齿轮副图标，显示齿轮副对话框，如图 4-3 所示。

设置创建齿轮副的各项参数：

● 在 Gear Name 栏，输入或修改齿轮副名称。

● 在 Adams Id 栏，输入齿轮副的整数标号。

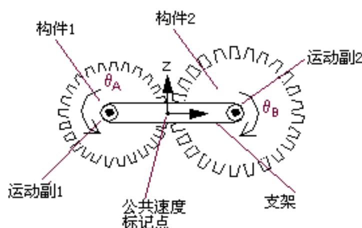


图 4-2 齿轮副

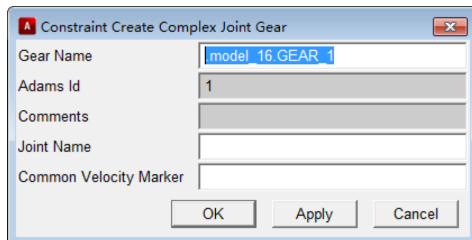


图 4-3 齿轮副对话框

● 在 Comments 栏，可以输入有助于管理的任何注释内容。

● 在 Joint Name 栏，输入齿轮副的两个约束的名称，ADAMS/View 自动在两个名称之间添加一个“，”号。也可以选择约束，在输入文本框中单击鼠标右键，在弹出式菜单中选择“Pick”，然后拾取约束。

● 在 Common Velocity Marker 栏，输出齿轮副的公共速度标记点名称，也可以采取与选择约束同样的方式选择标记点。如果没有公共速度标记点，可以用鼠标右键显示弹出式菜单，从中选择 Create 命令，可以产生一个新的标记点。

（4）单击 OK 按钮，完成齿轮副创建。

4.5.4 施加耦合副

耦合副可以将两个或 3 个运动副的运动关联起来。如果模型中有带轮、链轮和滑轮，耦合副就用来传递运动和能量。可以使用多个关联副将许多运动副相互联系起来，组成一个复杂的带轮系统，如图 4-4 所示。创建耦合副前，应先创建耦合的运动副。

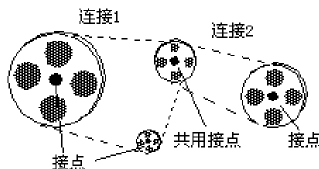


图 4-4 耦合副

创建耦合副的方法如下：

（1）在主工具箱中的约束工具集中选择耦合副图标。

（2）先选择主动运动副，然后选择从动运动副，完成耦合副的创建。这时的耦合副的各参数为 ADAMS/View 的默认值。

（3）可以对耦合副的各参数进行如下操作进一步完成设置：

● 在耦合副上单击鼠标右键，选择 Modify 命令，弹出修改对话框，如图 4-5 所示。

● 可以在 Name 文本输入框修改关联副的名称。

● 选择连接两个运动副（Two Joint Coupler）还是 3 个运动副（Three Joint Coupler）。

● 选择连接关系是线性（Linear）还是非线性（Non- Linear）。

● 在 Driver 和 Coupler 栏，修改或输入主动和从动运动副及其类型。对圆柱副约束，需要在 Freedom Type 栏选择连接处是旋转运动（Rotational）还是直线运动（Translational）。

● 在 Scale 栏，输入连接系数。

4.5.5　修改理想运动副

ADAMS/View 允许对已经创建的运动副进行修改，可以通过两种方法显示修改运动副对话框：

● 通过弹出式菜单。选择要修改的运动副，在运动副上单击鼠标右键，在弹出式菜单中选择 Modify 命令，ADAMS/View 显示修改运动副对话框。

● 通过命令菜单。通过选择菜单栏中的 Edit 菜单中的 Modify 命令，如果事先已经选择了要修改的运动副，ADAMS/View 弹出修改运动副对话框；如果事先没有选择任何对象，ADAMS/View 弹出数据库浏览器，可以在数据库浏览器中选择要修改的运动副，并单击数据库浏览器下边的“OK”按钮，ADAMS/View 显示修改运动副对话框。表 4-1 中除了耦合运动副和齿轮副之外的所有理想运动副的修改对话框如图 4-6 所示。

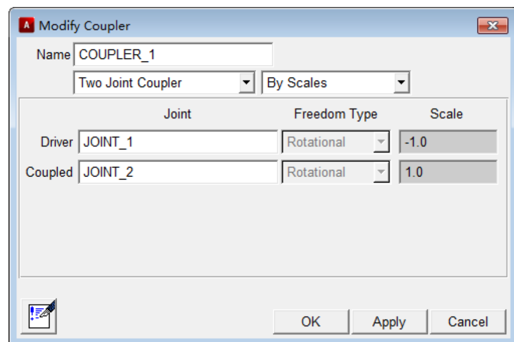


图 4-5　耦合副修改对话框

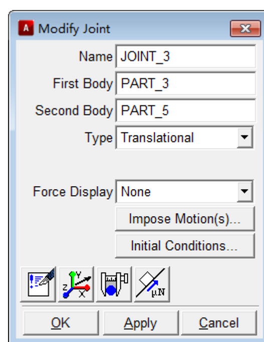


图 4-6　理想运动副修改对话框

通过修改运动副对话框，可以修改和设置以下已经建立的运动副的相关参数：

（1）运动副名称（Name）。如果不想使用 ADAMS/View 为运动副设置的名称，在这项可以为运动副设置名称。

（2）相互连接的构件 1（First Body）和构件 2（Second Body）。通过此项可以改变构件间的相互运动关系。

（3）运动副类型（Type）。通过此项可以将当前的运动副类型直接改成其他满足要求的运动副。此项中可以选择 ADAMS/View 为用户提供的所有运动副类型。

（4）是否显示连接力（Force Display）。设置仿真分析时是否显示连接力，其中：

- None——不显示连接力；
- On First Body——在构件 1 上显示连接力；
- On Second Body——在构件 2 上显示连接力。

（5）设置运动副的运动。可以指定运动副中可以活动轴的运动规律。例如，可以设置旋转副的绕 z 轴转动按一定的时间函数规律运动。

（6）设置初始条件。对旋转副、移动副和圆柱副可以设置初始条件，包括构件 1 的连接点相对于构件 2 的初始位移和初始速度等。

（7）对旋转副、移动副、圆柱副、万向副和球副。可以设置动态和静态摩擦力，以及预紧力。施加方法如下：

1）选择修改运动副对话框下面的摩擦力施加图标，显示运动副施加对话框。不同类型的运动副，运动副摩擦力设置对话框的内容也不同。

2）根据运动副摩擦力设置对话框中的各项要求，输入有关参数。例如， 旋转副的摩擦力施加对话框如图 4-7 所示。

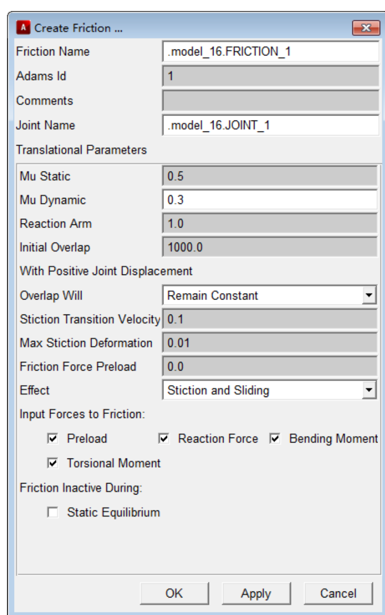


图 4-7　旋转副的摩擦力施加对话框

4.6 虚约束

ADAMS/View 除为用户提供了丰富的常用约束之外还提供了 5 种常用的虚约束工具如表 4-2 所示。可以通过应用这些虚约束组成不同的约束，从而自定义一些新的运动副，

或者组合不同的运动副，实现更复杂的运动约束。

表 4-2　虚约束

Joint Primitives

约束描述	Parallel Axis 构件 1 的 Z 轴始终平行于构件 2 的 Z 轴	Perpendicular 构件 1 的 Z 轴始终垂直于构件 2 的 Z 轴	Orientation 约束两个构件之间的相互转动	InPlane 一个点只能沿着指定的平面运动	InLine 构件 1 连接点只能沿构件 2 连接点标记 Z 轴运动
约束的自由度	2 个转动	1 个转动	3 个转动	3 个转动	2 个移动

创建虚约束的方法如下：

（1）选择约束工具集中的浮动图标，显示约束浮动窗口，选择虚约束工具。

（2）在设置栏选择连接构件的方法，一共有 3 种方式：

● 1 个位置（1Location）。选择一个连接位置，由 ADAMS/View 确定连接的构件。此时 ADAMS/View 自动选择最靠近所选连接位置的构件进行连接，如果所选连接点附近只有一个构件，则该构件将同地面连接。只有在两个构件的连接位置非常接近时，才可以由 ADAMS/View 确定连接构件，并且由 ADAMS/View 确定连接构件时，ADAMS/ View 并不区分第一个构件与第二个构件。因此对于要求明确指出第一个构件与第二个构件的约束，这种方法不适用。

● 两个构件 1 个位置（2Bod—1 Loc）。选择需连接的两个构件和一个连接位置。此时约束固定在第一个构件上（即先选择的构件），第一个构件相对于第二个构件运动。

● 两个构件两个位置（2Bod—2 Loc）。选择需连接的两个构件以及两个构件上的约束连接位置。

（3）选择连接方向。连接方向决定了构件间相对运动的轴线方向，有两种选择方法：

● 垂直栅格平面（Normal to Grid）。当工作栅格显示时，约束方向垂直于栅格平面，否则约束方向垂直于屏幕。

● 选择约束方向（Pick Feature）。通过选择一个在栅格平面或屏幕内的方向矢量确定约束的方向。

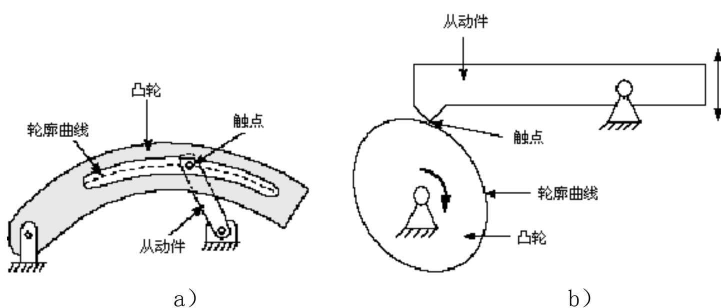
（4）根据状态栏提示，选择一个或两个构件。

（5）确定连接点的位置。

（6）如果在选择连接方向时选择了 Pick Feature 选项，可以拖动鼠标绕对象移动，此时显示表示连接方向的箭头。当方向满足要求时，单击左键，完成指定约束的设置。

4.7 创建高副

ADAMS/View 为用户提供了两种形式的高副，点-线约束（如图 4-8 所示）和线-线约束（如图 4-9 所示）。



a）　　　　b）

图 4-8　点-线约束

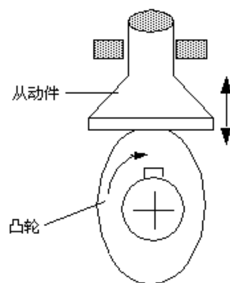


图 4-9　线-线约束

在点-线约束中，定义构件 1 为从动件，可以作旋转运动，同时构件 1 上的触点始终沿着构件 2（凸轮）上的轮廓曲线运动。构件 2（凸轮）上的轮廓曲线可以为平面曲线，也可以为空间曲线，可以为开口的或封闭的。对于图 4-8a 所示的结构，轮廓线为导向槽的中心线；对于图 4-8b 所示的结构，轮廓线为凸轮的外轮廓线。

在线-线约束中，构件 1（从动件）上的曲线始终沿着构件 2（凸轮）的轮廓线运动，两曲线可以是开口的或者封闭的。图 4-9 所示的平底凸轮机构为线-线约束的一个特例。应用线-线约束时应该注意构件间只允许有一个触点，即两曲线在任何瞬时都只在一点接触，如果两曲线在瞬时有多个点接触，必须为每个接触点都创建线-线约束。

创建高副的方法如下：

（1）在主工具箱的约束工具集中选择点-线约束工具图标或线-线约束工具图标。

（2）对于点-线约束选择从动件上的触点；对于线-线约束选择从动件上的曲线。

（3）选择凸轮的轮廓曲线。



提示

创建高副应注意：

- 使用足够多的点来定义曲线；
- 尽可能的使用封闭曲线；
- 所定义的曲线应该包括凸轮运动的全部范围；

- 避免将初始触点定义在曲线的节点附近；
- 避免线-线约束具有多个触点；
- 可以利用一条曲线定义多个接触约束。

高副创建完成后，可以对两种约束进行修改或设置初始条件。修改凸轮机构的方法如下：

（1）选择要修改的高副，在弹出式菜单中选择 Modify 命令，显示高副修改对话框。点-线约束修改对话框如图 4-10 所示，线-线约束修改对话框如图 4-11 所示。

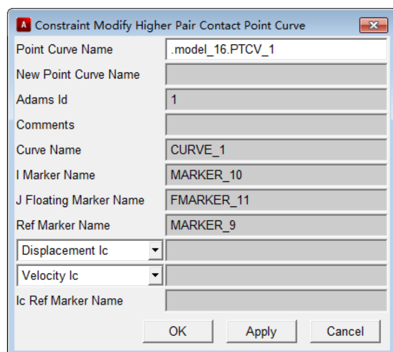


图 4-10　点-线约束修改对话框

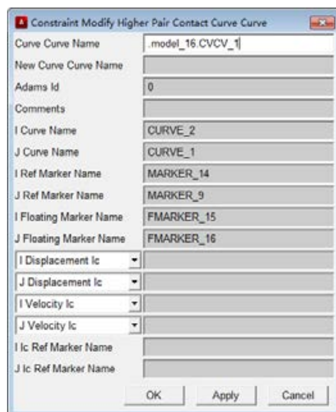


图 4-11　线-线约束修改对话框

（2）可以改变高副的名称（在 New Curve Curve Name 文本框中输入高副的新名称）和标识号（Adams Id）。

（3）在 Comment 栏可以输入对高副的注释。

（4）输入和修改高副的基本参数。

点-线约束基本参数包括：

- Curve Name：凸轮的曲线名称，触点将沿该曲线运动；
- I Marker Name：定义从动件上的触点的点标记名称；
- J Floating Marker Name：浮动标记名称，浮动标记位于运动过程中的接触点，其 Y 轴指向接触点处凸轮的法向，X 轴指向触点处凸轮切向，Z 轴指向触点处凸轮次法向；
- Ref Marker Name：凸轮机架参考坐标的名称。

线-线约束基本参数包括：

- I Curve Name：从动件曲线的名称；
- J Curve Name：凸轮的曲线名称；
- I Ref Marker Name：从动件曲线参考坐标名称；
- J Ref Marker Name：凸轮机架参考坐标的名称；
- I Floating Marker Name：从动件浮动标记名称，该标记位于从动件的触点，其 y 轴指向接触点处从动件曲线的法向，x 轴指向触点处从动件曲线的切向，z 轴指向触

点处从动件曲线的次法向；

- J Floating Marker Name：凸轮浮动标记名称，浮动标记位于凸轮的接触点，其 y 轴指向接触点处凸轮曲线的法向，x 轴指向触点处凸轮曲线的切向，z 轴指向触点处凸轮曲线的次法向。

（5）修改和设置初始条件。

凸轮的初始条件包括：初始位移和初始速度。

点-线约束基本参数包括：

- Displacement Ic 或 No Displacement Ic：设置或不设置在凸轮上的初始触点，如果初始触点不在凸轮曲线上，ADAMS/View 将使用凸轮曲线上距离初始触点最近的一点作为触点；
- Velocity Ic or No Velocity Ic：设置或不设置初始接触的初始速度；
- Ic Ref Marker Name：初始触点的参考坐标名称，如果不设置坐标，ADAMS/View 将取凸轮曲线的参考坐标为初始触点的参考坐标。

线-线约束基本参数包括：

- I Displacement Ic or No I Displacement Ic：是否设置从动件曲线上的初始触点；
- J Displacement Ic or No J Displacement Ic：设置或不设置凸轮曲线上的初始触点；
- I Velocity Ic or No I Velocity Ic：设置或不设置触点沿从动件曲线初始速度；
- J Velocity Ic or No J Velocity Ic：设置或不设置触点沿凸轮曲线初始速度；
- I Ic Ref Marker Name：从动件曲线上的初始触点的参考坐标名称；
- J Ic Ref Marker Name：凸轮曲线上的初始触点的参考坐标名称。

（6）单击 OK 按钮结束对高副的修改。

4.8 定义机构运动

4.8.1 机构运动类型

机构都是以一定的运动规律运动的，通过定义机构的运动规律，一方面可以约束机构的某些自由度，另一方面也决定了是否需要施加力来维持所定义的运动。

ADAMS/View 为用户提供了以下两种类型的运动：

（1）运动副运动（Joint Motion）：运动副运动定义了移动副、转动副或圆柱副中的移动或转动运动，每一个运动副运动去除一个自由度。

（2）点运动（Point Motion）：点运动定义两个零件之间的运动规律。定义点运动规律时，要指明运动的方向。点运动可以应用于任何典型的运动副，如圆柱副、球副等。

通过定义点的运动可以在不增加额外约束和构件的情况下，构造复杂的运动。

运动可以定义为整个过程中的加速度、位移或速度。在默认的状态下，通过定义整个过程的恒定运动速度定义运动。可以通过下面 3 种方法中的任一种定义运动值：

（1）直接输入移动或转动的速度值。默认情况下，转速的单位为°/s，移动速度单位为长度单位/时间单位（例如，mm/s）。

（2）函数表达式。可以利用 ADAMS/View 为用户提供的以时间为变量的寒暑表大事来精确定义运动副的运动。

（3）输入自编子程序的传递参数。可以自编一个子程序来定义非常复杂的运动，此时在参数栏输入的是传递给子程序的有关参数。

在定义运动时应注意以下几点：

- 对任何已经定义运动的运动副，不要设置所定义的运动方向的初始条件。
- 可以定义运动值为零，此时等价于将两个构件固定起来。
- 如果定义的运动导致非零的初始加速度，ADAMS/Solver 在运动学仿真的最初 2～3 步积分分析中，可能会产生不可靠的加速度和速度，ADAMS/Solver 在输出时，会自动纠正这些错误。但是，如果设置了同初始速度有关联的加速度或力传感器，则可能会发生错误，此时应该修改初始条件，使初始加速度为零。
- 如果使用速度和加速度定义运动，在动力学仿真分析时不能用 ABAM 法积分。

4.8.2　创建运动副运动

ADAMS/View 中有两种运动副运动：移动和转动。对于移动运动，ADAMS/View 约束构件 1 沿构件 2 的 z 轴的移动，对于旋转运动，约束构件 1 按右手定则绕构件 2 的 z 轴旋转，要求构件 1 的 z 轴必须始终同构件 2 的 z 轴保持平行。当夹角为零时，构件 1 的 x 轴同构件 2 的 x 轴平行。

创建运动副运动的方法如下：

（1)在运动工具集或约束浮动对话框中选择运动副移动工具图标或运动副转动运动工具图标。

（2）在设置栏输入速度值。ADAMS/View 的旋转运动默认值为 30.0°/s，移动运动默认值为 10.0mm/s，如图 4-12 所示。

如果想用函数表达式或自编子程序定义运动值，可以将鼠标右击 Speed 输入栏，从弹出的菜单中选择 Parameterize 项，再选择 Expression Builder 命令，此时显示函数输入对话框，如图 4-13 所示。利用函数输入对话框可以输入各种函数。

（3）鼠标左键选择要施加运动的运动副，完成连接运动设置。

ADAMS/View 允许对创建的运动副运动进行修改。选中要修改的运动副运动，单击鼠标右键弹出快捷菜单，选择 Modify 命令，弹出运动修改对话框。以转动运动为例，修改

对话框如图 4-14 所示。

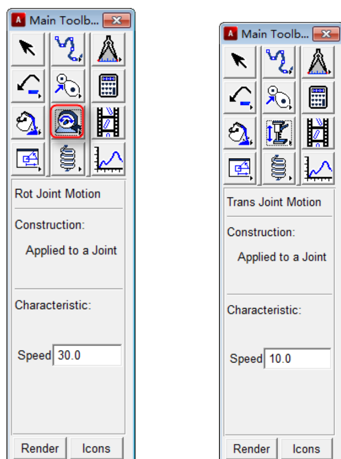


图 4-12　设置运动副

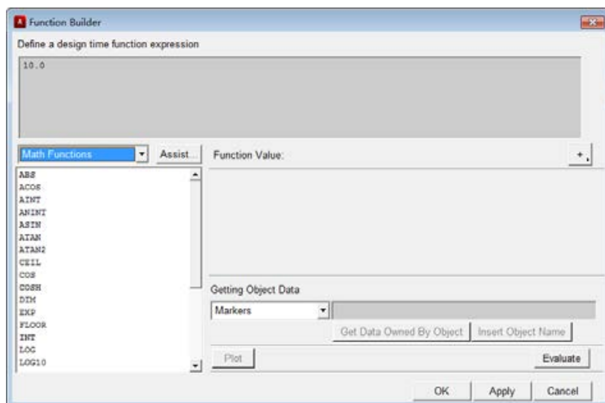


图 4-13　函数输入对话框

可以修改运动副运动以下特性：

- Name 栏可以修改运动名称。
- Joint 栏可以修改运动作用的运动副，此时运动类型 Joint Type 也随运动副的改变而变化。
- Direction 栏可以修改运动的方向，包括旋转或移动。
- 在 Define Using 栏修改运动值输入的方法。
- 在 Function(time)栏输入运动值。
- 在 Type 栏选择定义运动值的方法。
- 在 Displacement IC 栏输入初始位移，或在 Velocity IC 栏，输入初始速度。

选择 OK 按钮，完成运动副运动的修改。

4.8.3　创建点运动

在 ADAMS/View 中可以创建两种类型的点运动：

- 单点运动。单点运动描述两个构件沿着一个轴移动或绕着一个轴转动，默认状态下为沿着 z 轴方向移动或转动。在创建单点运动时要指定 z 轴的方向，还可以改变运动的参考轴。
- 一般点运动。一般点运动描述两个构件沿着 3 个轴（6 个自由度）移动或转动。

创建点运动时，需要指定运动的类型、运动作用的位置和运动的方向。ADAMS/View 在运动作用的位置为每个构件创建标记点。ADAMS/View 在首先选择的构件上创建的标记点称为动点，在第二个构件上创建的标记点称为参考点，动点相对于参考点移动或转动。根据右手定则，参考点的 z 轴方向为正方向。

创建点运动的方法如下：

（1）在运动工具集或约束浮动对话框中，选择单点运动工具图标，或一般点运动工具图标。

（2）在设置栏选择连接构件的方法、连接方向、运动类型和速度值，如图 4-15 所示。

（3）根据屏幕底部状态栏的提示选择构件、连接位置和方向等。

可以通过快捷菜单显示修改运动对话框修改有关参数：

● 运动作用的构件或运动副。如果点运动在两个构件之间定义，可以通过修改定义运动位置和方向的标记点来改变运动的位置和方向，也可以指定动点和参考点。如果点运动作用在运动副上，也可以改变点运动作用的运动副。

● 点运动的参考轴或自由度。

● 一般点运动特性参数包括：

✧ 运动的定义方式（位移，速度或加速度）。

✧ 运动数值的输入方式（数值，函数表达式或传递给用户自定义子程序的参数）。

● 初始位移或初始速度。

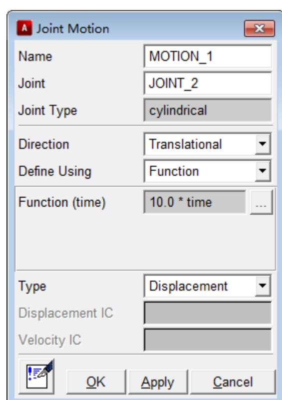


图 4-14　转动运动修改对话框

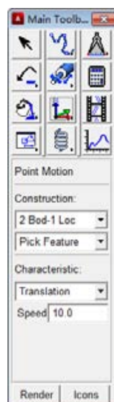


图 4-15　设置点运动

4.8.4　添加约束的技巧

下面是一些有利于正确地约束构件的技巧，这些技巧有利于正确地建立模型。

（1）在创建样机模型时，应该逐步地对构件施加各种约束，并且不断地对施加的约束进行仿真，检查是否有约束错误，通过这种方法可以比较容易地发现约束错误。

（2）在创建运动约束时，要注意选择对象的顺序，正确选择对象。ADAMS/View 规定在两个相互连接的构件中，构件 1 被连接到构件 2 上。

（3）要注意约束的方向是否正确。错误的约束方向，会导致某些自由度没有被约束，或者约束了不应该约束的方向。

（4）注意约束类型是否正确。

（5）尽量使用一个运动副来完成所需的约束，如果用多个运动副来约束两个构件，每个运动副实现的自由度约束可能重复，这样会导致无法预料的结果。

（6）定期检查样机模型的自由度。在 Tools 菜单，选择 Model Verify 命令，可以显示当前样机模型的相关信息包括自由度信息。

（7）在没有作用力的状态下，通过运行系统的运动学分析来检验样机。如果可能的话，建议在进行样机的动力学分析之前先进行运动学分析，通过运动学分析，可以确定样机在施加作用力之前，各种约束是否正确。有时为了进行运动学分析，需要添加一些临时约束。

（8）去除样机模型中的多余约束，即使在进行仿真分析时程序运行良好，也应该将多余约束去除。

（9）对于任何已经施加了运动的运动副，不要设置初始条件。对已经设置了运动和初始条件的运动副，ADAMS/Solver 在求解时，将使用设置的运动条件，而忽略设置的初始条件。

（10）可以定义一个不随时间变化的零值速度，这种零值速度的定义等价于将两个构件固定在一起。

（11）如果在初始状态，所定义的速度产生非零的加速度，ADAMS/Solver 在进行动力学分析的最初 2～3 步内部迭代运算过程中将无法得到可靠的加速度和速度。ADAMS/Solver 在输出仿真结果时，可以自动地纠正这一错误。但是，如果此时对有关加速度和速度设置了传感器，则在最初的内部迭代运算过程中，传感器就会检测到错误结果而产生误动作，如果发生这种情况，可以修改初始条件。

（12）如果样机系统的自由度为零，而且含有用速度或加速度表达式定义的速度，则该系统不能进行运动学分析，只能进行动力学分析。

4.9 应用实例——曲柄滑块机构

根据本章内容建立一个曲柄滑块机构。

4.9.1 启动 ADAMS/View

（1）通过开始程序菜单运行 Adams-View 2012，或直接双击桌面上的快捷方式 Adams - View 2012。

（2）在欢迎对话框中，选择 New Model 选项；设置好工作路径，在模型名字栏输入 qubinghuakuai，重力设置选择 Earth Normal 选项，单位设置选择 MKS 系统（m，kg，N，s，deg），如图 4-16 所示。

（3）设置完毕单击 OK 按钮。



图 4-16　设置欢迎界面

4.9.2　设置建模环境

（1）单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，将界面切换为经典界面。

（2）在 Settings 菜单选择 Working Grid 项，设置工作栅格，Size 在 x 和 y 向分别为 1750mm 和 1500mm，Spacing 在 x 和 y 向均为 50mm，确认 Show Working Grid 是选中状态，如图 4-17 所示，设置完毕单击 OK 按钮。

（3）在主工具箱中选择缩放工具按钮，在窗口内上下拖动鼠标，使之能够显示整个工作栅格。

（4）在 Settings 菜单，选择 Gravity 项，设置重力加速度对话框，确认 Gravity 为选中状态，X=0.0，Y=-9.80665，Z=0.0，如图 4-18 所示，设置完毕单击 OK 按钮。

（5）按 F4 键，打开坐标窗口，如图 4-19 所示。

（6）在 File 菜单，选择 Select Directory 项，指定保存文件的目录。

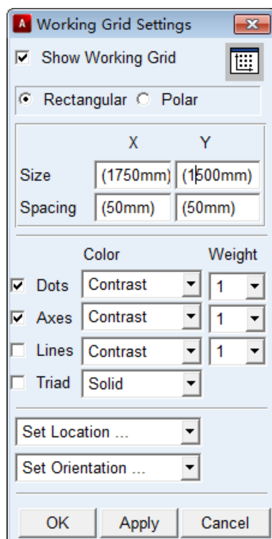


图 4-17　设置工作栅格

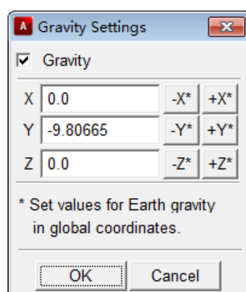


图 4-18　重设重力

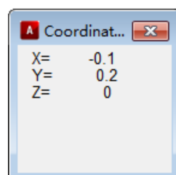


图 4-19　坐标窗口

4.9.3　几何建模

（1）在主工具箱中用鼠标右键单击几何模型工具按钮，在弹出的级联工具栏中选择定义点工具按钮，如图 4-20 所示。

（2）在工具栏下方的参数设置中，选择默认设置：Add to Ground 和 Don’t Attach，如图 4-21 所示。

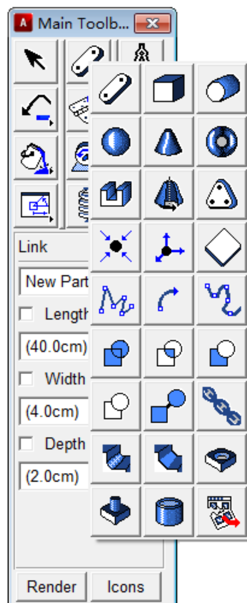


图 4-20　定义连接点

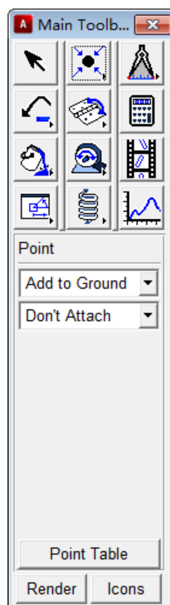


图 4-21　设置参数

（3）在（0，0，0）位置处按鼠标左键，窗口中显示一个标记点，系统自动命名为 Point_1，如图 4-22 所示。

（4）重复步骤（1）～（3），在（0.5，0，0）和（1.5，0，0）位置处建立两个标记点，分别为 Point_2 和 Point_3。

（5）在主工具箱中选择几何建模工具，设置参数 New Part，鼠标左键分别单击 Point_1 和 Point_2，建立曲柄如图 4-23 所示。

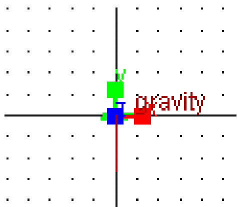


图 4-22　建立标记点

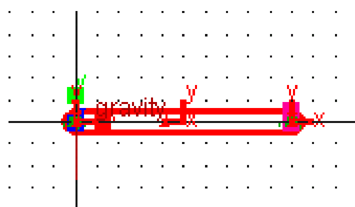


图 4-23　建立曲柄

（6）用鼠标右键单击曲柄，在弹出的菜单中选择 Part：PART_2->Rename，如图 4-24 所示，重新命名为 wheel。

（7）用鼠标右键单击曲柄，在弹出的菜单中选择 Part　wheel>Modify，如图 4-25 所示，设置曲柄的物理特性。

（8）在修改对话框中，可以接受默认设置：Define Mass By 项选择 Geometry and Material Type，在 Material Type 项中选择 materials steel，如图 4-26 所示。

（9）绘制完毕，在主工具箱中选择工具按钮，在工具箱中出现视图按钮工具。

（10）在主工具箱中选择移动视图工具按钮，在窗口内向左拖动鼠标，为后面建立滑块留出位置。

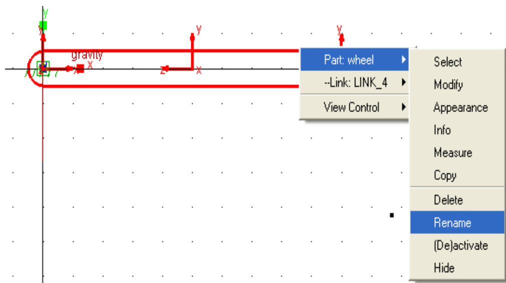


图 4-24　给部件命名

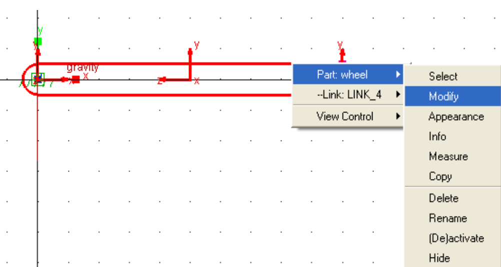


图 4-25　设置物理特性

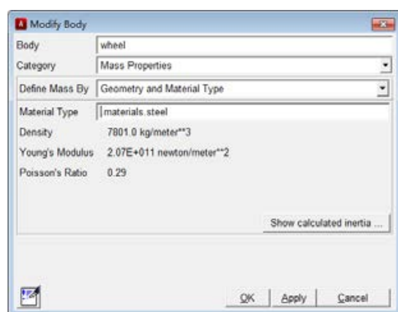


图 4-26　修改物理特性对话框

（11）重复步骤（5）～（7），在 Point_2 和 Point_3 之间建立连杆 handle，如图 4-27 所示。

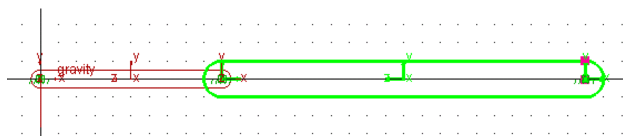


图 4-27　建立连杆

（12）用鼠标右键单击连杆，在弹出的菜单中选择 handle->Modify，设置曲柄的物理特性。在修改对话框中，Define Mass By 项选择 User Input，设置 Mass 为 42，Ixx 为 4.1，Iyy 为 4.0，Izz 为 4.3，如图 4-28 所示。

（13）在几何建模工具箱中选择 Box 工具，设置参数 New Part，在窗口中选择点（1.35.0.15.0），拖动鼠标到点（1.65，-0.15，0），建立滑块如图 4-29 所示。

（14）改变滑块名字为 piston。

（15）用鼠标右键单击滑块，在弹出的菜单中选择 piston->Modify，设置曲柄的物理特性。在修改对话框中，Define Mass by 项选择 Geometry and Material type，在 Material Type 项中按鼠标右键，选择 Material->Guesses，如图 4-30 所示，在材料菜单中选择 brass。

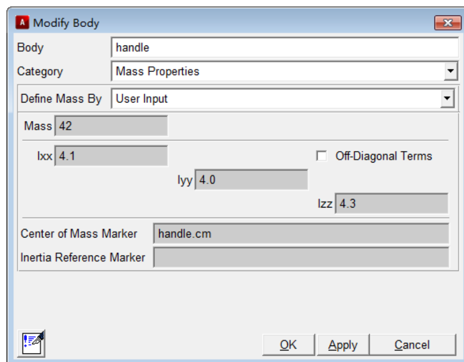


图 4-28　设置连杆属性

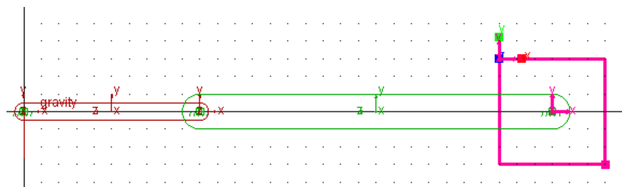


图 4-29　建立滑块

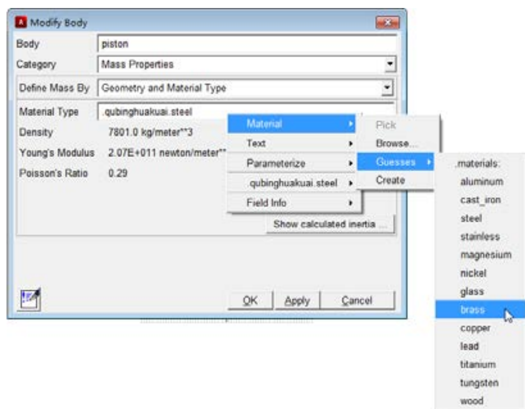
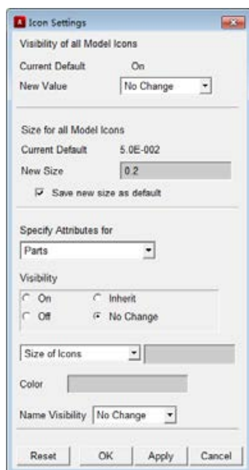


图 4-30　选择材料

4.9.4　添加约束

（1）为了更清楚地看见各种标记，在 Settings 菜单选择 Icons，在 Size for all Model Icons 项中的 New Size 栏输入 0.2，如图 4-31 所示，设置完毕单击 OK 按钮。

（2）在 wheel 与大地间建立旋转铰接副。在主工具箱中的连接工具集中，选择旋转铰接副，并设置参数：1 Location，Normal to Grid。在窗口内选择 Point_1 点，建立旋转副，如图 4-32 所示，系统自动命名为 Joint_1。



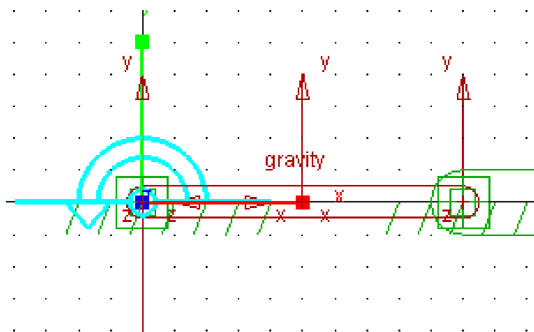
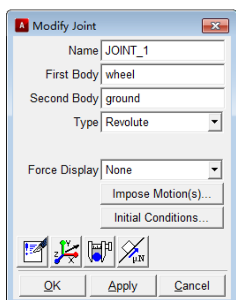


图 4-31　设置 Icon 大小　　　　图 4-32　建立铰接副

（3）鼠标右键单击 Joint_1，在弹出的菜单中选择 Joint_1->Modify，在修改对话框中确认连接的两个物体是 wheel 和 ground，如图 4-33 所示。

（4）在 wheel 与 handle 间建立一铰接副。在主工具箱中的连接工具集中，选择旋转铰接副，并设置参数：2 Body-1 Loc，Normal to Grid。用鼠标首先选择 wheel，再选择 handle，然后选择 Point_2，建立旋转副，系统自动命名为 Joint_2。

（5）在 handle 与 piston 间建立一铰接副。在主工具箱中的连接工具集中，选择旋转铰接副，并设置参数：2 Body-1 Loc，Normal to Grid。用鼠标首先选择 handle，再选择 piston，然后选择 Point_3，建立旋转副，系统自动命名为 Joint_3，如图 4-34 所示。



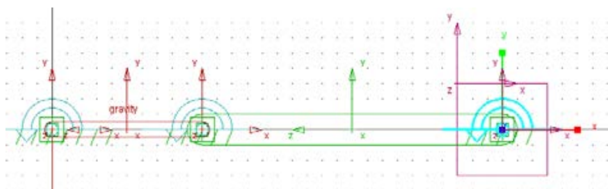


图 4-33　铰接副修改对话框　　　　图 4-34　建立铰接副

（6）设定滑块只能水平移动。在主工具箱中选择移动副工具按钮，设置参数：2 Bod-1 Loc，Pick Feature，依次选择 piston 和大地（即窗口内空白位置处），并沿水平

方向定义运动箭头，建立移动副，如图 4-35 所示。

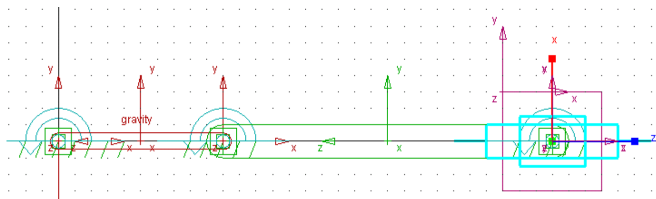


图 4-35　建立移动副

（7）给曲柄添加运动约束，使之逆向 360º 旋转。在主工具箱中选择旋转运动工具按钮，设置参数：在 speed 栏输入 360.0，即每秒转动 360º 。选择 Joint_1，建立旋转运动，窗口内出现标志转动的大箭头，如图 4-36 所示。

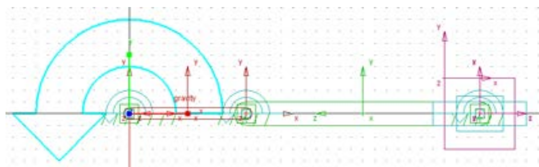


图 4-36　建立旋转运动

4.9.5　运动仿真

（1）在主工具箱中选择仿真工具按钮，设置参数：End time=3.0，Steps=200，单击开始仿真按钮，模型开始运动，如图 4-37 所示。

（2）在仿真过程中，可以按停止按钮结束仿真。

（3）仿真结束后，可以按返回按钮返回至开始状态。

（4）仿真结束后，可以按重放按钮回放仿真过程。

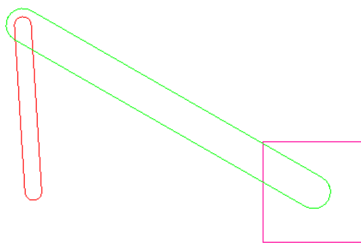


图 4-37　运动仿真

第 5 章

施加载荷

本章将详细讲解 ADAMS 如何对模型施加载荷。首先介绍可施加的载荷类型以及定义力值的方法，如何施加载荷，并详尽介绍弹簧阻尼器、轴套力、力场等柔性连接，最后学习如何创建并设置接触载荷。

学习要点

- 载荷类型及定义方法
- 施加载荷
- 柔性连接
- 创建接触

5.1 载荷类型及定义方法

5.1.1 基本载荷类型

载荷并不完全阻止或描述运动，因此并不会使系统自由度增加或减少。一些载荷阻止运动的进行，如弹簧阻尼器，还有一些载荷促进运动的进行。ADAMS/View 提供的载荷：

（1）作用力。它可以直接改变系统的运动状态。

（2）柔性连接。柔性连接阻碍运动的进行，用户只需提供产生柔性连接力的常系数，因此柔性连接比作用力更简单易用。这种力包括梁、轴衬、移动弹簧阻尼器和扭矩弹簧。

（3）特殊力。特殊力是经常会遇到的，如轮胎力和重力等。

（4）接触。接触定义了运动模型中相互接触构件间的相互作用关系。

5.1.2 定义载荷值和方向的方法

定义力的数值时，可以定义沿某方向的矢量值，也可以定义力在 3 个坐标轴方向的分量。ADAMS/View 允许采取以下方式定义载荷的值：

（1）输入阻尼和刚度系数，在这种情况下 ADAMS/View 会自动的根据两点之间的距离和速度确定力的值。

（2）利用 ADAMS/View 的函数库，输入函数表达式，可以为各类型的力输入函数表达式。下面列出了各类型的函数：

- 位移、速度和加速度函数。它们使力与点或构件的运动相关。
- 力函数。它取决于系统中其他的力。如库仑力，它的大小和两构件间的法向力成正比关系。
- 数学函数。包括正弦函数、余弦函数、级数、多项式和 step 函数。
- 样条函数。借助样条函数，可以由数据表插值的方法获得力值。
- 冲击函数。它使力的作用像只受压缩的弹簧一样作用，当构件相互接触时函数起作用，当构件分开时函数失效。

（3）输入传递给用户自定义的子程序的参数。

定义力方向方法：沿坐标标记的坐标轴定义力方向，或沿两点连线的方向定义力。

5.2 施加载荷

在 ADAMS/View 中施加的作用力，可以是单方向的作用力，也可以是 3 个方向的力和

力矩分量，或者是 6 个方向的分量（3 个力的分量，3 个力矩的分量）。单方向的作用力可以用施加单作用力的工具来定义，而组合作用力工具可以同时定义多个方向的力和力矩分量。

在定义力时，需要指明是力还是力矩、力作用的构件和作用点、力的大小和方向。可以指定力作用在一对构件上，构成作用力和反作用力，也可以定义一个力作用在构件和地基之间，此时反作用力作用在地基上，对样机没有影响。

5.2.1　施加单方向作用力

在定义单作用力和力矩时，需要说明表示力的方式（参照的坐标系），力作用的构件和作用点、力的大小和方向，施加方法如下：

（1）根据施加单方向力还是单方向力矩，在作用力工具集中选择单方向力工具图标，或单方向力矩工具图标。

（2）系统打开设置栏，设置如图 5-1 所示。

1）在 Run-time Direction 设置栏，选择力的作用方式：

- Space Fixed（参照地面坐标）。此时力的方向不随构件的运动而变化，力的反作用力作用在地面框架上，在分析时将不考虑和输出反作用力。
- Body Moving（参照构件参考坐标）。此时力的方向随作用构件的运动而变化，但是相对于指定的构件参考坐标始终没有变化。如果反作用力作用在地面框架上，分析时将不考虑。
- Two Bodies（参照两构件的运动）。此时 ADAMS/View 沿两个构件的力作用点，分别作用两个大小相同方向相反的力。

如果以上选择了采用 Space Fixed 或 Body Moving 方式定义力，需要在 Construction 栏，选择力方向的定义方法：Normal to Grid （定义力垂直于栅格平面，如果工作栅格没有打开，则垂直于屏幕）或 Pick Feature（利用方向矢量定义力的方向）。

2）在 Characteristic 栏，选择定义力值的方法：输入力值（Constant）、输入力或力矩数值或自定义(Custom)。如果要采用自定义函数或自定义子程序定义力，选择 Custom 项。

（3）根据状态栏的提示，首先选择力或力矩作用的构件，然后选择力或力矩作用的作用点。注意，如果选择了“Two Bodies”的力作用方式，首先选择的构件是产生作用力的构件，其次选择的构件是产生反作用力的构件。

（4）如果选择采用方向矢量定义力的方向，需定义方向矢量。环绕力作用点移动鼠标，此时可以看见一个方向矢量随鼠标的移动而改变方向，选择合适的方向然后按鼠标左键完成施加力。

（5）如果选择了使用自定义函数或自定义子程序定义力，此时将显示修改力对话框，

如图 5-2 所示，可以利用修改力对话框，输入自定义函数或自定义子程序的传递参数。

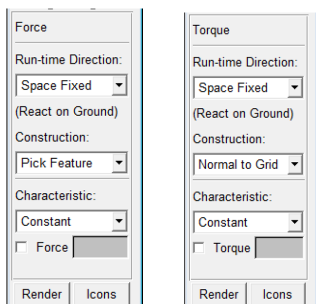


图 5-1　单方向力及力矩设置对话框

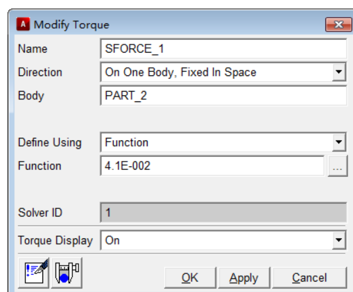


图 5-2　修改力对话框

5.2.2　施加分量作用力

任何力都可以用沿着 *x*、*y*、*z* 轴方向的 3 个力分量来表示，任何扭矩也都可以用绕 *x*、*y*、*z* 轴方向的 3 个扭矩分量来表示，ADAMS/View 为用户提供了通过施加分力和分力矩的方法施加载荷的工具。ADAMS/View 允许施加分力的类型有 3 个力分量、3 个扭矩分量和 6 个分量的一般载荷（3 个力分量和 3 个扭矩分量）。

在施加作用力时，先选择的构件为力作用的构件，其次是反力作用的构件。ADAMS/View 在两个构件上分别建立一个标记点，力作用的构件上的标记点称为作用力标记点，记为 I 标记点，反力作用的构件上的标记点称为反作用力标记点，记为 J 标记点。J 标记点是浮动的，始终随 I 标记点一起运动。ADAMS/View 同时还创建第三个标记点称为参考标记点，它指定力的方向。在施加作用力时，可以指定参考标记点的方向。

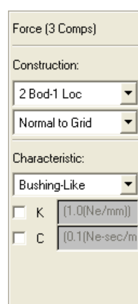
施加分量作用力的方法如下：

（1）在作用力工具集中选择分量作用力工具图标：施加 3 个分力工具图标、施加 3 个分力矩工具图标、同时施加 3 个分力和 3 个分力矩工具图标。

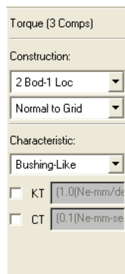
（2）系统打开设置对话栏，设置各项参数，如图 5-3 所示。

1）力的定义方式：

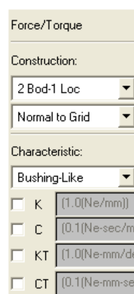
- 1Loc-Bodies Implied：此种方法只需选择一个力的作用点，ADAMS/View 自动选择距力作用点最近的两个构件为力作用的构件，如果在力作用点附近只有一个构件，这时力作用于该构件和大地之间。此种方法只适合相距很近的两构件，并且力作用的构件和反力作用的构件顺序不重要的情况。
- 2Bodies-1Location：此种方法需先后选择两个构件和力在两构件上的公共作用点。选择的第一个构件为力作用的构件，第二个为反力作用的构件。
- 2Bodies-2Locations：允许先后选择两个构件和不同的两个力作用点。如果两个力作用点的坐标标记不重合，在仿真开始时可能会出现力不为零的现象。



3 分力设置



3 力矩设置



3 分力/力矩设置

图 5-3　分量作用力设置对话框

2）力方向的定义方法：

- Normal to Grid：力或力矩矢量的分量方向垂直于工作栅格或屏幕。
- Pick Geometry Feature：使力或力矩矢量的分量方向沿着某一方向，例如，沿着构件的一个边，或垂直于构件的一个面。

3）定义力值的方法：

- Constant：直接键入力值的大小。选中 Force Value，在后面的文本输入框中输入力值。
- Bushing-Like：键入刚度系数 K 和阻尼系数 C。
- Custom：自定义。ADAMS/View 不设置任何值，力创建以后，可以通过输入函数表达式或传递给用户自定义子程序的参数来修改力。

（3）根据状态栏的提示，选择作用力和反作用力作用的构件、力的作用点和力的方向，完成力的施加。

（4）如果希望用函数表达式或自定义子程序定义力，可以利用修改力对话框，输入函数表达式或自定义子程序的传递参数。

通过修改对话框，可以改变力作用的构件、参考标记点、力的各分量值和力的显示与否。以 3 个力分量为例，其修改对话框如图 5-4 所示。

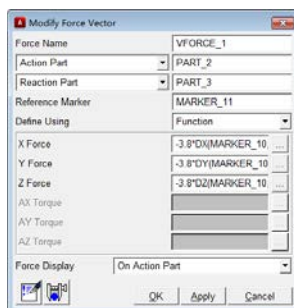


图 5-4　3 个力分量修改对话框

5.3 柔性连接

5.3.1 拉压弹簧阻尼器

拉压弹簧阻尼器可以在具有一定距离的两构件间，施加一对带有阻力的弹簧力。力的大小线性地取决于弹簧阻尼器两端点间的相对位移和相对速度，其力学模型如图 5-5 所示。

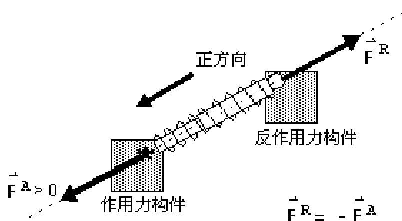


图 5-5 拉压弹簧阻尼器力学模型

作用力的数学表达式如下：

$$force = -C(\mathrm{d}r/\mathrm{d}t) - K(r - r_0) + f_0 \qquad (5\text{-}1)$$

式中，r为弹簧两端的相对位移；r_0为弹簧两端的初始相对位移；$\mathrm{d}r/\mathrm{d}t$为弹簧两端的相对速度；C为粘滞阻尼系数；K为弹簧刚度系数；f_0为弹簧的预作用力。

施加弹簧阻尼器要求在两构件上指定弹簧阻尼器两端点的位置，作用力作用在先选择的位置上，ADAMS/Solver 自动在后选择的位置施加和一个作用力大小相等方向相反的反作用力。施加弹簧阻尼器的方法如下：

（1）在作用力工具集中选择拉压弹簧阻尼器工具图标。

（2）系统打开设置对话框，如图 5-6 所示，在设置栏输入弹簧刚度系数 K的值和粘滞阻尼系数 C的值。当$C = 0$时，弹簧阻尼器变为一个没有阻尼的纯弹簧器；当$K = 0$时，弹簧阻尼器变为一个纯阻尼器。

（3）根据状态栏的提示，选择弹簧阻尼器的第一个端点和第二个端点，完成创建。

如果弹簧阻尼器有初始作用力，可以通过修改弹簧阻尼器来施加初始作用力。选择设置好的弹簧阻尼器对象，单击鼠标右键打开弹出式菜单，选择其中的“修改弹簧阻尼器”对话框修改弹簧阻尼器。修改弹簧阻尼器的对话框如图 5-7 所示。

可以修改的参数包括：

1）Name 栏：修改拉压弹簧阻尼器的名称。

2）Action Body 和 Reaction Body 栏：分别为拉压弹簧阻尼器作用力和反作用力作用的构件。

3）Stiffness and Damping 栏：选择和定义弹簧刚度系数和粘滞阻尼系数，其中：



图 5-6　设置弹簧阻尼器

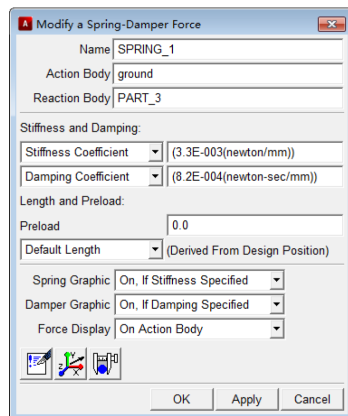


图 5-7　拉压弹簧阻尼器修改对话框

- No Stiffness 和 No Damping 分别表示不考虑弹簧力和粘滞阻尼力；
- Stiffness Coefficient 和 Damping Coefficient 分别表示输入弹簧刚度系数和粘滞阻尼系数；
- Spline:*F*=*f*(defo)和 Spline:*F*=*f*(velo) 分别表示输入弹簧力与变形关系的样条函数和阻尼力与速度关系的样条函数。

4）Preload 栏：输入拉压弹簧阻尼器的预作用力。

5）初始位移的定义方式如下：

- Default Length 选项表示初始位移为创建拉压弹簧阻尼器时的位移；
- Length at Preload 选项表示输入初始位移。

6）Spring Graphic、Damper Graphic 和 Force Display 栏：分别为弹簧力图、阻尼力图和力图的显示方式。

5.3.2　扭转弹簧阻尼器

扭转弹簧阻尼器在两构件间施加一个大小相等方向相反的扭矩，根据右手定则确定扭矩的正方向。ADAMS/View 在每个位置创建一个标记点，分别为 I 标记点和 J 标记点，I 标记点和 J 标记点的 *z* 轴始终保持一致。计算扭矩数学表达式如下：

$$torque = -C_T(\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t) - K_T(\alpha-\alpha_0) + t_0 \tag{5-2}$$

式中，α 为弹簧的扭转角；C_T和K_T 为扭转阻尼系数和弹簧扭转刚度系数；α_0 为初始扭转角；t_0 为初始扭矩。

ADAMS/Solver 自动计算 $\mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t$ 和 α，α 为 I 标记点和 J 标记点的 *x* 轴之间的夹角。

施加扭转弹簧阻尼器的方法如下：

（1）在作用力工具集中选择扭转弹簧阻尼器工具图标。

（2）系统打开设置对话框，如图 5-8 所示，在设置栏定义如下各项：

- 扭矩定义方式：1Loc-Bodies Implied、2Bodies-1Location 或 2Bodies-2Locations；
- 扭矩方向定义方式：Normal to Grid 或 Pick Geometry Feature。
- 输入弹簧扭转阻尼系数 C_T 和扭转刚度系数 K_T 。

（3）根据状态栏的提示，选择扭矩和反作用扭矩的构件、扭矩的作用点和扭矩的方向，完成扭转弹簧阻尼器的施加。

可以利用修改扭转弹簧阻尼器对话框，如图 5-9 所示，修改有关设置。可以修改的内容包括：扭转弹簧阻尼器作用的构件、扭转刚度系数和阻尼系数、扭转弹簧阻尼器的初始扭矩值、是否显示弹簧力和阻尼力图等。

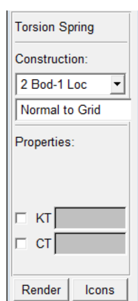


图 5-8　设置扭转弹簧阻尼器

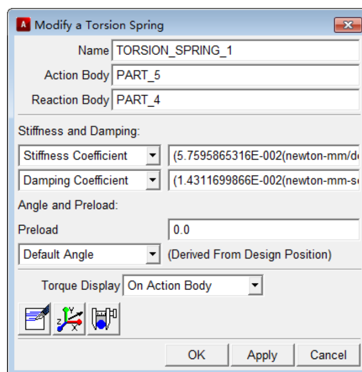


图 5-9　扭转弹簧阻尼器修改对话框

5.3.3　轴套力

轴套力是一种两构件相互作用的弹簧和阻尼力，通过定义 6 个笛卡尔坐标的力和力矩分量（F_x,F_y,F_z,T_x,T_y,T_z）在两构件间施加柔性力，力是移动位移和速度的线性函数；力矩是转动位移和速度的线性函数。

施加轴套力时，ADAMS/View 在两构件的用户所选位置创建两个标记点，先选择的构件上的标记点为 I 标记点，后选择构件上的标记点为 J 标记点。

ADAMS/Solver 采用下面的公式计算轴套力：

$$\begin{bmatrix}F_x\\F_y\\F_z\\T_x\\T_y\\T_z\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}K_{11}&0&0&0&0&0\\0&K_{22}&0&0&0&0\\0&0&K_{33}&0&0&0\\0&0&0&K_{44}&0&0\\0&0&0&0&K_{55}&0\\0&0&0&0&0&K_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\y\\z\\a\\b\\c\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}C_{11}&0&0&0&0&0\\0&C_{22}&0&0&0&0\\0&0&C_{33}&0&0&0\\0&0&0&C_{44}&0&0\\0&0&0&0&C_{55}&0\\0&0&0&0&0&C_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}V_x\\V_y\\V_z\\\omega_x\\\omega_y\\\omega_z\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}F_1\\F_2\\F_3\\T_1\\T_2\\T_3\end{bmatrix} \tag{5-3}$$

式中，F_x,F_y 和 F_z 为 x、y、z 轴方向的力分量值；T_x,T_y 和 T_z 为 x、y、z 轴方向的力矩分量值；x,y 和 z 为 x、y、z 轴方向 I，J 标记点之间的相对移动位移分量值；a,b 和 c 为 x、y、z 轴方向 I，J 标记点之间的相对转动位移分量值；K 和 C 为刚度系数和阻尼系数；V_x,V_y 和 V_z 为 x、y、z 轴方向 I，J 标记点之间的相对移动速度分量值；ω_x,ω_y 和 ω_z 为 x、y、z 轴方向 I，J 标记点之间的相对转动速度分量值；F_1,F_2 和 F_3 为 x、y、z 轴方向的初始力分量值；T_1,T_2 和 T_3 为 x、y、z 轴方向的初始力矩分量值。

轴套力的作用力和力矩采取下式计算：

$$F_j=-F_i,\qquad T_j=-T_i-\delta F_i \tag{5-4}$$

式中，δ 为 J 标记点相对 I 标记点的瞬时变形矢量。当 J 标记点处的力与 I 标记点处的力大小相等方向相反时，由于轴套单元的变形导致 J 标记点处的力臂不等于 I 标记点处的力臂，所以 J 标记点处的力矩通常并不等于 I 标记点处的力矩。

应该注意的是，ADAMS/View 要求 3 个转动位移分量 a,b,c 中，至少有 2 个是非常小的。也就是说，在 3 个相对转动位移中，至少有 2 个的值应该小于 10º。此外，如果 a 大于 90º，b 将无法确定；如果 b 大于 90º，a 将无法确定。只有 c 可以大于 90º，而且不会引起收敛问题的出现。因此在定义轴套力时，应该保证 a 和 b 取小值。

轴套力的施加方法如下：

（1）在作用力工具集中选择轴套力工具图标。

（2）系统打开设置对话框，如图 5-10 所示。在设置栏定义如下各项：

- 轴套力定义方式：1Loc-Bodies Implied、2Bodies-1Location 或 2Bodies-2Locations；
- 轴套力方向定义方式：Normal to Grid 或 Pick Geometry Feature。
- 输入拉压和扭转阻尼系数 C_T 和刚度系数 K_T。

（3）根据状态栏的提示，选择轴套力作用和反作用的构件、轴套力的作用点和轴套力的方向，完成轴套力的施加。

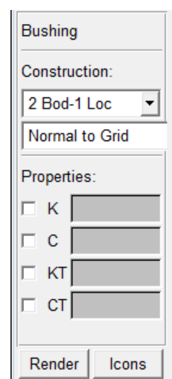


图 5-10　设置对话框

可以利用轴套力修改对话框，修改轴套力的设置。其方法同 5.3.1 节中修改弹簧阻尼器的方法。

5.3.4　无质量梁

无质量梁在梁的两端点间产生拉压力和扭转力矩。无质量梁为等截面梁。在施加无质量梁时，ADAMS/View 在梁的两个端点创建两个标记点，先选择的构件上的标记点为 I 标记点，后选择构件上的标记点为 J 标记点。无质量梁产生的力和力矩的大小和梁端点

处两标记点之间的相对位移和速度成线性关系。J 标记点的 x 轴定义了梁的中心轴，y 轴和 z 轴定义了梁横截面的主轴。当梁处于未偏转的位置时，I 标记点和 J 标记点有相同的角速度方向。如图 5-11 所示，在梁的两端点之间，作用有线性的拉伸力和扭转力矩，包括：

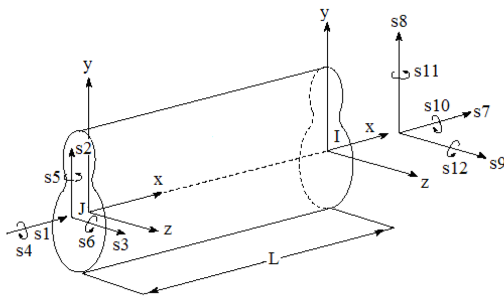


图 5-11 无质量梁

- 轴向力（S1，S7）；
- y 轴和 z 轴方向的转矩（S5，S6，S11 和 S12）；
- x 轴方向的转矩（S4，S10）；
- 剪切力（S2，S3，S8 和 S9）。

ADAMS/Solver 采用下面的公式计算梁中力和力矩：

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & K_{26} \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{53} & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & K_{62} & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x-L \\ y \\ z \\ a \\ b \\ c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{31} & C_{41} & C_{51} & C_{61} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \tag{5-5}$$

式中，F_x, F_y 和 F_z 为 x、y、z 轴方向的拉压力；T_x, T_y 和 T_z 为 x、y、z 轴方向的转矩；x, y 和 z 为 x、y、z 轴方向 I，J 标记点之间的相对移动位移分量值；a, b 和 c 为 x、y、z 轴方向 I，J 标记点之间的相对转动位移分量值；K 和 C 为刚度系数和阻尼系数；L 为梁 I，J 标记点之间的距离（梁的长度）；V_x, V_y 和 V_z 为 x、y、z 轴方向 I，J 标记点之间的相对移动速度分量值；ω_x, ω_y 和 ω_z 为 x、y、z 轴方向 I，J 标记点之间的相对转动速度分量值。

式（5-5）中刚度矩阵（K 矩阵）和阻尼矩阵（C 矩阵）均为对称矩阵，ADAMS/Solver

采用下面的公式确定刚度矩阵中的各 K 值：

$$
\begin{aligned}
&K_{11} = EA/L \\
&K_{22} = 12EI_{zz}/[L^3(1+P_y)] \\
&K_{26} = -6EI_{zz}/[L^2(1+P_y)] \\
&K_{33} = 12EI_{yy}/[L^3(1+P_z)] \\
&K_{35} = 6EI_{yy}/[L^2(1+P_z)] \\
&K_{44} = GI_{xx}/L \\
&K_{55} = (4+P_z)EI_{yy}/[L(1+P_z)] \\
&K_{66} = (4+P_y)EI_{zz}/[L(1+P_y)]
\end{aligned}
\tag{5-6}
$$

式中，E 为材料的弹性模量；A 为梁截面的面积；L 为梁未发生变形时 x 轴方向的长度；$P_y = 12EI_{zz}A_{sy}/(GAL^2)$；$P_z = 12EI_{yy}A_{sz}/(GAL^2)$；$A_{sy}, A_{sz}$ 为 y 和 z 方向的铁木辛柯梁剪切变形修正系数。

ADAMS/Solver 采用下式计算反作用力构件 J 标记点处的反作用力和转矩：

$$
\begin{aligned}
&F_j = -F_i \\
&T_j = -T_i - L \times F_i
\end{aligned}
\tag{5-7}
$$

创建无质量梁的方法如下：

（1）在作用力工具集中选择无质量梁工具图标。系统打开设置对话框，如图 5-12 所示。

（2）在第一个构件上，选择梁的端点位置，第一个构件为作用力作用的构件。

（3）在第二个构件上，选择梁的端点位置，第二个构件为反作用力作用的构件。

（4）选择梁截面的向上方向（y 方向）。

在施加无质量之后，可以通过弹出式菜单，显示无质量的修改对话框。通过修改对话框，如图 5-13 所示，可以修改无质量梁的坐标系、刚度系数和阻尼系数、杨式模量和剪切模量、梁的长度和面积等。

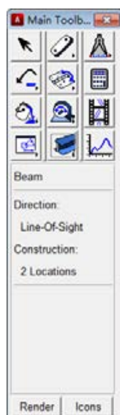


图 5-12　设置无质量梁



图 5-13　修改无质量梁

5.3.5　力场

力场是一般的在两位置间施加拉压作用力、转矩和反作用力的力施加工具。可以根据输入值来施加线性力场和非线性力场。

（1）施加线性力场。要输入一个 6×6 的刚度矩阵、初始拉压力和初始扭矩、一个 6×6 的阻尼矩阵。刚度矩阵和阻尼矩阵必须为半正定的，但可以是非对称的，也可以通过指定阻尼率来代替阻尼矩阵。

（2）施加非线性力场。通过用户自定义子程序来定义 3 个力分量和 3 个转矩分量来施加力场。

ADAMS/Solver 采用下式计算力场：

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & K_{15} & K_{16} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & K_{25} & K_{26} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & K_{35} & K_{36} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & K_{64} & K_{65} & K_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \\ a - a_0 \\ b - b_0 \\ c - c_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (5\text{-}8)$$

创建力场注意事项：

- 为了使式（5-8）的结果准确，3 个转动位移中至少两个的值比较小，也就是说 3 个中的两个要小于 10º。并且只允许 C 的值大于 90º。
- 3 个转动角并不是欧拉角，而是 I 标记点相对于 J 标记点的投影角，ADAMS/Solver 测量关于 J 标记点的 x、y 和 z 轴的夹角来定义 3 个转动角。
- 刚度矩阵和阻尼矩阵必须是半正定的，但不一定对称。

因为力场工具提供了定义最一般的力的方法，因此也可以利用力场工具来定义一般情况下的梁，例如，边截面梁或者是使用非线性材料梁。

利用力场工具图标可以施加力场，系统打开图 5-14 所示的设置对话框，施加方法和施加轴套力的方法相似。



图 5-14　设置力

5.4 创建接触

接触定义了仿真过程中，自由运动物体间发生碰撞时物体间的相互作用。接触分为两种类型：平面接触和三维接触。

ADAMS/View 允许下面的几何体间发生平面接触：

- 圆弧；
- 圆；
- 曲线；
- 作用点；
- 平面。

ADAMS/View 允许下面的几何体间发生三维接触：

- 球体；
- 圆柱体；
- 圆锥体；
- 矩形块；
- 一般三维实体，包括拉伸实体和旋转实体；
- 壳体（具有封闭体积）。

ADAMS/View 为用户提供了 10 种类型的接触情况，如表 5-1 所示。可以通过这些基本接触的不同组合仿真复杂的接触情况。

表 5-1　不同的接触

序号	接触类型	第一个几何体	第二个几何体	应用实例
1	内球与球	椭圆体	椭圆体	具有偏心和摩擦的球铰
2	外球与球	椭圆体	椭圆体	三维点-点接触
3	球与平面	椭圆体	标记点（z 轴）	壳体的凸点与平面接触
4	圆与平面	圆	标记点（z 轴）	圆锥或圆柱与平面接触
5	内圆与圆	圆	圆	具有偏心和摩擦的转动副
6	外圆与圆	圆	圆	二维点与点接触
7	点与曲线	点	曲线	尖点从动机构
8	圆与曲线	圆	曲线	凸轮机构
9	平面与曲线	平面	曲线	凸轮机构
10	曲线与曲线	曲线	曲线	凸轮机构

ADAMS/Solver 采用两种方法计算接触力（法向力）：回归法和 IMPACT 函数法。回归法要定义两个参数，惩罚参数和回归系数，惩罚参数起加强接触中单边约束的作用，回

归系数起控制接触过程中能量消耗的作用。ADAMS/Solver 采用的 IMPACT 函数法，接触力实际上相当于一个弹簧阻尼器产生的力。

接触施加的方法如下：

（1）在作用力工具集中选择接触工具图标，打开如图 5-15 所示对话框。

（2）在 Contact Type 选择栏选择接触的类型：Solid to Solid、Curve to Curve、Point to Curve、Point to Plane、Curve to Plane、Sphere to Plane。

（3）可以在 Contact Type 选择栏下方，根据对话框提示分别输入第一个几何体和第二个几何体的名称；可以通过弹出菜单来选择相互接触的几何体，方法为：在文本输入框中单击右键，选择接触体命令下的 Pick 命令，然后用鼠标在屏幕上选择已经创建好的接触几何体；也可以用 Browse 命令，显示数据库浏览器，从中选择几何体；还可以用 Guesses 命令直接选择相互接触的几何体的名称。

（4）设置是否在仿真过程中显示接触力，选中 Force Display 则显示接触力，否则不显示。

（5）选择接触力（法向力）计算方法：Restitution 或 Impact。当选择 Restitution 时，要输入惩罚参数（Penalty）和回归系数（Restitution Coefficient），如图 5-15 所示；当选择 Impact 时，要输入刚度系数（Stiffness）、力的非线性指数（Force Exponent）、最大粘滞阻尼系数（Damping）、最大阻尼时构件变形深度（Penetration Depth），如图 5-16 所示。

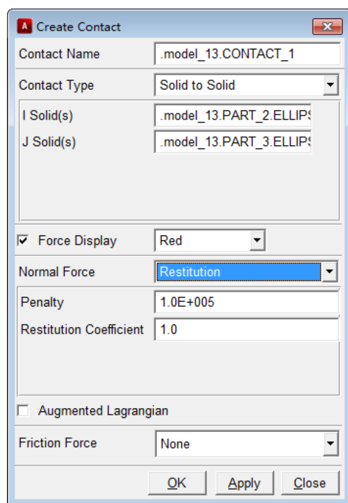


图 5-15　回归法计算接触力的接触创建对话框

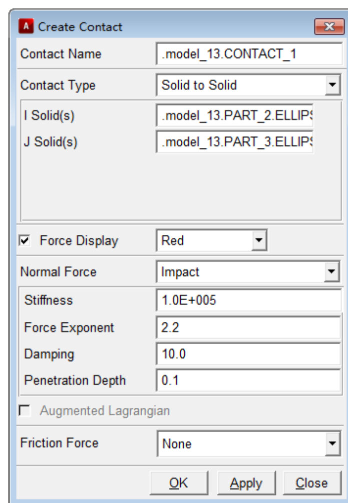


图 5-16　IMPACT 函数法计算接触力的接触创建对话框

（6）设置摩擦力。

（7）选择 OK 按钮，完成接触的创建。

施加接触之后，可以利用弹出式对话框显示接触修改对话框，如图 5-17 所示。修改对话框和施加接触对话框相似，各设置参数和施加时的参数相同。

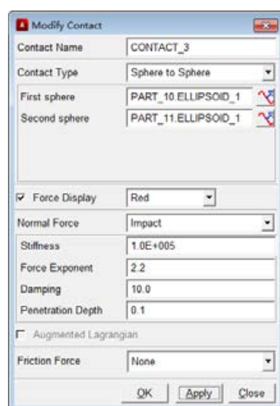


图 5-17　接触修改对话框

第 6 章

计算结果后处理

后处理模块 PostProcessor 是 ADAMS 针对 View、Vibration、Control、Car 等模块添加的后处理功能插件，利用此模块可以对模型进行仿真分析，并根据分析结果优化虚拟样机。本章详细讲解了 PostProcessor 模块的使用过程，主要包括基本操作、输出仿真结果动画、绘制仿真结果曲线图及对曲线图进行处理。

学 习 要 点

- ADAMS/PostProcessor 基本操作多载荷步求解
- ADAMS/PostProcessor 输出仿真动画
- ADAMS/PostProcessor 绘制仿真曲线
- 曲线图的处理

6.1 ADAMS/PostProcessor 简介

6.1.1　ADAMS/PostProcessor 的用途

ADAMS/ PostProcessor 是 ADAMS 软件的后处理模块，绘制曲线和仿真动画的功能十分强大，利用 ADAMS/ PostProcessor 可以使用户更清晰地观察其他 ADAMS 模块（如 ADAMS/ View、ADAMS/ Car 或 ADAMS/ Engine）的仿真结果，也可将所得到的结果转化为动画、表格或者 HTML 等形式，能够更确切地反映模型的特性，便于对仿真计算的结果进行观察和分析。ADAMS/PostProcessor 在模型的整个设计周期中都发挥着重要的作用，其用途主要包括：

1．模型调试

在 ADAMS/ PostProcessor 中，可选择最佳的观察视角来观察模型的运动，也可向前、向后播放动画，从而有助于对模型进行调试。也可从模型中分离出单独的柔性部件，以确定模型的变形。

2．试验验证

如果需要验证模型的有效性，可输入测试数据并以坐标曲线图的形式表达出来，然后将其与 ADAMS 仿真结果绘于同一坐标曲线图中进行对比，并可以在曲线图上进行数学操作和统计分析。

3．设计方案改进

在 ADAMS/PostProcessor 中，可在图表上比较两种以上的仿真结果，从中选择出合理的设计方案。另外，可通过单击鼠标操作更新绘图结果。如果要加速仿真结果的可视化过程，可对模型进行多种变化。也可以进行干涉检验，并生成一份关于每帧动画中构件之间最短距离的报告，帮助改进设计。

4．结果显示

ADAMS/PostProcessor 可显示运用 ADMAS 进行仿真计算和分析研究的结果。为增强结果图形的可读性，可以改变坐标曲线图的表达方式，或者在图中增加标题和附注，或者以图表的形式表达结果。为增加动画的逼真性，可将 CAD 几何模型输入到动画中，也可将动画制作成小电影的形式。最终可在曲线图的基础上得到与之同步的三维几何仿真动画。

6.1.2　启动与退出 ADAMS/PostProcessor

ADAMS/PostProcessor 可单独运行，也可从其他模块（如 ADAMS/ View、ADAMS/ Car、

ADAMS/ Engine 等）中启动。下面将介绍如何启动 ADAMS/PostProcessor，并解释如何在 ADAMS/PostProcessor 中运行附件和插件。

1. ADAMS/PostProcessor 的启动方法：

（1）直接启动 ADAMS/PostProcessor

在 Windows 操作系统中，单击 Windows 开始菜单，依次指向“所有程序”、“MSC.software”、“Adams 2012”、“APostProcessor”，然后单击“ADAMS - PostProcessor”，就可直接启动进入 ADAMS/ PostProcessor 窗口。

（2）在 ADAMS/View 或其他 ADAMS 模块中启动 ADAMS/PostProcessor。在 ADAMS/View 的菜单中单击“Review”，然后选择 PostProcessing 或按 “F8”键。另外一种方法是在主工具箱中选择 PostProcessor 图标。

（3）在其他 ADAMS 模块中启动 ADAMS/PostProcessor，可以参考这些模块的使用手册。

2. ADAMS/PostProcessor 的常用退出方法：

（1）如需从 ADAMS/PostProcessor 退回到 ADAMS/View，可按快捷键“F8”。

（2）用鼠标单击 ADAMS/PostProcessor 窗口右上角的按钮。

6.1.3 ADAMS/PostProcessor 窗口介绍

启动 ADAMS/PostProcessor 后进入 ADAMS/PostProcessor 窗口，如图 6-1 所示。

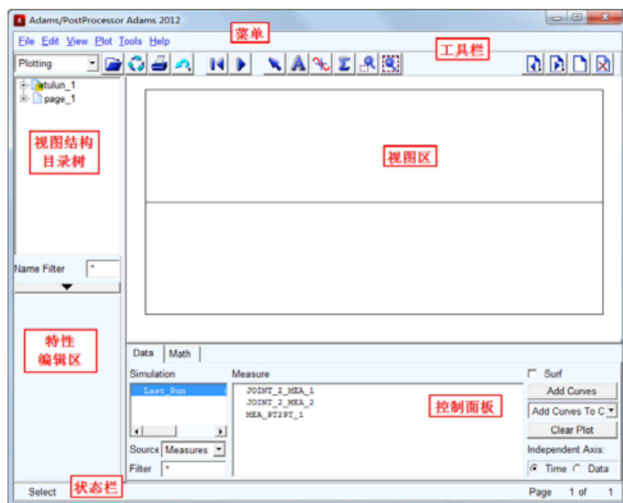


图 6-1 ADAMS/PostProcessor 窗口

ADAMS/PostProcessor 窗口中各部分的功能如下：

（1）视图区：显示当前页面，可在多个视图同时显示不同的曲线、动画和报告。

（2）菜单：包含几个下拉式菜单，完成后处理的操作。

（3）工具栏：包含常用后处理功能的图标，可自行设置需显示哪些图标。

（4）视图结构目录树：显示模型或页面等级的树形结构。

（5）特性编辑区：改变所选对象的特性。

（6）状态栏：在操作过程中显示相关的信息。

（7）控制面板：提供对结果曲线和动画进行控制的功能。

6.2 ADAMS/PostProcessor 基本操作

启动 ADAMS/PostProcessor 后可建立新任务的“记录”并操作，创建任务和添加数据。ADAMS/PostProcessor 使用单一窗口界面，可以更方便快捷地输入信息，界面随所选择项目自动变化，界面操作包括工具栏、页面、窗口模式等。

6.2.1　创建任务和添加数据

启动 ADAMS/PostProcessor 后就开创了一个新任务，称为“记录”。要把仿真结果导入记录中，需要先输入相应的结果数据。如果采用直接启动 ADAMS/PostProcessor 的方式，当对仿真结果进行操作之后，可保存记录并输出数据以供其他程序使用。

1．创建新任务

每次单独启动 ADAMS/PostProcessor 时，自动创建一个新任务以进行工作，也可以随时创建新的任务。创建新任务的方法是在文件“File”菜单栏，选择“New”。

2．保存记录

在单独启动模式下，ADAMS/PostProcessor 可将当前任务保存在记录里，以二进制文件的格式保存所有的仿真结果动画和绘制的曲线。

（1）保存已存在并已命名的任务是从文件菜单“File”中，选择“Save”。

（2）保存一个新的未命名的文件或者以新的名字来保存文件是从文件菜单“File”中选择“Save As”，然后输入记录的名字。在不同的目录中保存文件时，鼠标右击“File Name”文字栏，选择“Browse”，然后选择想要保存的目录，最后选择“OK”。

3．添加数据

将不同文件格式的形式输入数据到 ADAMS/PostProcessor 中以生成动画、曲线图和报告，输入的数据出现在视图结构目录树顶端。不同文件格式的输入数据形式如表 6-1 所示。

4．输出数据

以数据电子表格的形式输出动画或曲线信息，并可用表格的形式输出曲线数据（HTML 或者电子表格的形式）或者 DAC 和 RPC III 数据（仅适用于 ADAMS/Durability）。也可

将动画记录为 AVI 电影、TIFF 文件或其他形式。

表 6-1 不同文件格式的输入数据形式

文件格式	描述
ADAMS/View Command （.cmd）	一套 ADAMS/View 的命令，包含模型信息。用它调入分析文件
ADAMS/Solver dataset （.adm）	用 ADAMS/Solver 数据语言描叙模型信息
ADAMS/Solver analysis（.req，.res，.gra）	3 种分析文件： Graphics——包含来自仿真的图形输出，并包含能描述模型中各部件位置和方向的时间序列数据，可使 ADAMS/PostProcessor 生成模型动画 Request——包含使 ADAMS/PostProcessor 产生仿真结果曲线的信息，也包含基于用户自定义信息的输出数据 Result——包含在仿真过程中 ADAMS/PostProcessor 计算得出的一套基本的状态变量信息 可导入整套或者单个数据文件
Numeric data	按列编排的 ASCII 文件，包含其他应用程序输出的数据
Wavefront objects，Stereolithgraphy，Render，and shell	曲面
Report	以 HTML 或 ASCII 格式表示的报告数据

以表格形式输出曲线：

（1）选择一条曲线。

（2）在文件菜单“File”的“Export”选中“Table”。

（3）输入该文件的名字。

（4）输入包含数据的曲线的名字。

（5）在 html 或 spreadsheet（电子表格）中任选一个。

（6）选中“OK”。

6.2.2　工具栏的使用

ADAM/PostProcessor 包含若干工具栏，位于菜单条下面。选择特定工具栏能完成相关的操作，使用特定的功能。

（1）主工具栏（如图 6-2、表 6-2 所示）。

（2）页面与视窗工具栏（如图 6-3、表 6-3 所示）。

（3）动画工具栏（如图 6-4、表 6-4 所示）。



图 6-2　主工具栏

表 6-2 主工具栏功能说明

工具	功能
	输入文件
	重新载入更新的仿真结果，以及最新的数据报告
	显示打印对话框以便打印该页面
	撤销上次操作
	重置动画到第一帧（仅在动画模式）
	播放动画（仅在动画模式）

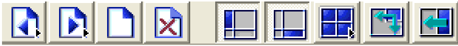


图 6-3　页面与视窗工具栏工具栏

表 6-3 页面与视图工具栏说明

工具	功能
	显示前页或第一页
	显示下一页或最后一页
	以当前布局创建新页
	删除显示页
	打开或关闭目录树
	打开或关闭控制板
	从 12 个标准页面布局中选择一个新的布局
	将所选择的视图扩展至覆盖整个页面
	将当前视窗的数据交换到其他数据窗口



图 6-4　动画工具栏

该工具栏只有在 ADAMS/PostProcessor 的动画模式下才能显示。

（4）图表工具栏（如图 6-5、表 6-5 所示）

图表工具栏只有在 ADAMS/PostProcessor 的图表模式下才显示出来。

表 6-4 动画工具栏说明

工具	功能
	选择模式
	旋转视图
	移动视图并设置比例
	将模型放到中间位置
	缩放视图
	将整个动画放置到适应整个窗口大小
	设置动画视图方位的工具
	线框模式与实体模式的切换开关
	光标默认显示的切换开关

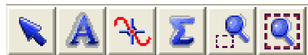


图 6-5　图表工具栏

表 6-5 图表工具栏说明

工具	功能
	设置选择模式
	增加文本
	显示曲线的统计值，包括曲线上数据点的最大值，最小值和平均值
	显示曲线编辑工具栏
	放大曲线图的一部分
	将曲线图以合适大小放在视窗内

1）工具栏的设置与显示。工具栏可以通过开关设置是否显示，也可以设置工具栏的位置是放在菜单下窗口的顶端还是底部，还可以打开或者关闭控制面板和目录树，默认情况是显示控制面板和目录树。主工具栏显示在窗口的顶端，曲线编辑和统计工具栏是关闭的，状态栏出现在窗口底部。

在“View”菜单中选中“Toolbars”，然后选择需要打开或关闭的工具栏。设置工具栏的位置：

- 在“View”菜单中选中“Toolbars”，然后选择“Settings”，打开工具栏设置对话框。
- 选择工具栏项目的可见性以及所选工具栏的位置，所作的设置会立刻生效。

2）工具栏的展开。在主工具栏中有些工具是下拉式的，出现在顶部的是默认的工具或最近用过的工具，这样的工具栏在其右下角有一个小三角标记。要选择这样工具栏中的工具时，右击这样的下拉式工具栏（其右下角有一个小三角标记），在展开的工具栏中

选择需要采用的工具。

6.2.3　窗口模式的设置

ADAMS/PostProcessor 有 3 种不同的窗口模式：动画、曲线绘制和报告模式。其模式改变依赖于当前视图的内容，例如加载动画模式时在窗口顶端工具栏中的工具就会相应改变。也可手动设置模式。

手动切换视图模式，可采用下面 3 种方法中的任一种：

（1）单击包含动画、绘图或报告的视图。

（2）在主工具栏的选项菜单中选择所需要的模式选项。

（3）鼠标右键单击视图窗口，再选择“Load Animation”、“Load Plot”或者“Load Report”。

6.2.4　ADAMS/PostProcessor 的页面管理

可以通过创建新页来达到显示动画和曲线图的目的。ADAMS/PostProcessor 中的一页最多有 6 个区，称为视图，在每个区中都可以显示动画和曲线。

1. 创建页面。从“View”菜单中指向“Page”，然后选择“New”，ADAMS/PostProcessor 将自动为新页分配一个名字。

2. 重命名页面

在目录树中选中需要重命名的页，再从“Edit”菜单中选择“Rename”，输入该页的新名字，最后选择“OK”。

3. 显示页面

如需显示特定页面，可在目录树中选择需要显示的页面，或者从“View”菜单中指向“Page”然后选择“Display”，再从页面列表中选择需要显示的页面。用“Previous page”、“First page”或“Last page”定位到前一页、首页或末页。

4. 显示页眉和页脚

选中有关页面后，在特性编辑区中选择“Header”或“Footer”，再分别选择“Left”、“Right”或“Center”，然后在特性编辑区相关区域输入有关信息，就可在页眉或页脚的相应区域加入文本或图形。

6.3 ADAMS/PostProcessor 输出仿真动画

ADAMS/PostProcessor 的动画功能可以将其他 ADAMS 产品中通过仿真计算得出的动画画面重新播放，有助于更直观地了解整个物理系统的运动特性。当加载动画或者将

ADAMS/PostProcessor 设置为动画模式时，ADAMS/PostProcessor 界面改变为允许对动画进行播放和控制。

6.3.1 动画类型

ADAMS/PostProcessor 可以加载两种类型的动画：时域动画和频域动画（在 ADAMS/Vibration 中的一种正则模态动画）。如果在 ADAMS 产品中使用 ADAMS/Vibration 插件，可以使用 ADAMS/PostProcessor 来观察受迫振动的动画。

1．时域动画

当在 ADAMS 产品中以时间为单位进行仿真，如在 ADAMS/View、ADAMS/Solver 中进行的动力学仿真分析时，分析引擎将对仿真的每一个输出步创建一个动画，画面随输出时间步长而依次生成，称为时域动画。例如，在 0.0～10.0s 的时间内完成仿真，以每 0.1s 作为输出的步长，ADAMS/Solver 将记录 101 步或帧的数据.它在 10s 中的每十分之一秒创建一帧动画。

2．频域动画

使用 ADAMS/PostProcessor 时，可观察到模型以其固有频率中的某个频率进行振动。它以特征值中的某个固有频率为操作点，将模型的变形动画循环地表现出来，动画中可以看到柔性体中阻尼的影响，并显示特征值的列表。

当对模型进行线性化仿真时，ADAMS/Solver 在指定工作点对模型进行线性化，并计算特征值和特征向量。ADAMS/PostProcessor 利用这些信息来显示通过特征解预测的动画变形形状。通过在正的最大变形量和负的最大变形量之间插值生成一系列动画。动画循环地显示了柔性体的变形过程，与频域参数有关，称为频域动画。

6.3.2 加载动画

在单独启动的 ADAMS/PostProcessor 中演示动画，必须导入一些相应的文件，或者打开已存在的记录文件（.bin），然后导入动画。如果在使用其他 ADAMS 的产品（如 ADAMS/View 等）的时候使用 ADAMS/PostProcessor， 已经运行了交互式的仿真分析，所需的文件在 ADAMS/PostProcessor 中就已经是可用的了，只需直接导入动画即可。

对于时域动画，必须导入包含动画的图形文件（.gra）。该图形文件可由其他 ADAMS 产品如 ADAMS/View 和 ADAMS/Solver 创建。对于频域模型，必须导入 ADAMS/Solver 模型定义文件（.adm）和仿真结果文件（.res）。

1．导入动画

从“File”菜单中选择“Import”，然后输入相关的文件。

2．在视窗中载入动画

右击视窗背景，弹出载入动画选项菜单，如图 6-6 所示。然后选择“Load Animation”载入时域仿真动画，或选择“Load Mode Shape Animation”载入频域仿真动画。

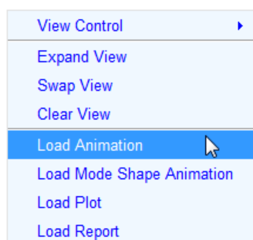


图 6-6　载入动画选项菜单

6.3.3　动画演示

当演示时域动画时，ADAMS/PostProcessor 按默认设置尽快显示每帧动画，默认状态下循环播放动画直到终止播放，也可设置只播放一次或者先向前再向后播放动画。

（1）向前播放动画：在控制面板选择。

（2）向后播放动画：在控制面板选择。

（3）一次播放一帧动画：在控制面板滑动杆两端单击向左或向右箭头按钮。

（4）暂停动画：在控制面板选择。

（5）将动画重置回起点：在控制面板选择。

设置动画的播放选项是在控制面板设置“Loop”为：

Forever：不断地循环播放动画。

Once：只播放动画一次。

Oscillate Once：先向前播放动画，然后向后播放动画（如在 100 帧动画中，先从 1～100 播放，然后再从 100～1 播放）。

Oscillate forever：重复地向前，向后播放动画。

6.3.4　时域动画的控制

1．播放部分时域动画

默认状况下 ADAMS/PostProcessor 采用基于时间的动画画面。可以选择跳过一定数量的帧，仅仅播放以时间或帧数为单位的一部分动画。例如，要察看在 3.0～5.5s 之间的动画，可设定开始时间为 3.0s 和结束时间为 5.5s。

（1）跳过帧数。在控制面板上选择“Animation”，在帧增加栏“Frame Increment”填入要跳过的帧数，然后播放动画。

（2）播放动画的一部分。在控制面板上选择“Animation”，选择播放单位“Display Units”为帧“Frame”或时间“Time”，在开始“Start”栏填入开始的帧数或时间，并

在结束“End”栏填入结束的帧数或时间，然后播放动画。

2．设置动画速度

可以通过改变时域动画中每帧动画之间的时间延迟来改变动画速度，通过使用控制面板上的滑动杆来引入时间延迟。默认状况下，当滑动杆向右时就是将动画尽可能快地播放；向左移动滑动杆可引入时间延迟，最大可达到 1s。

需要设置动画速度时，在控制面板上选择“Animation”，单击并拖动“Speed Control”滑动杆至达到所需的时间延迟。

3．演示特定动画帧

ADAMS/PostProcessor 提供了播放特定动画帧的几个选项。可以一次播放一帧，或播放某特定时间的某一帧。此外还可用动画帧表示：模型输入——表示模型仿真前的状态，不表达模型部件的初始条件和静态解；静平衡状态；构件之间的接触。

（1）在动画中演示某一帧。在控制面板上选择“Animation”，然后执行以下任一操作：

- 单击并拖动最上端的控制条直至要演示的帧数或者时间。
- 在滑动条右端的输入框里填入要演示的帧数或者时间。

（2）演示代表模型输入的帧。在控制面板上选中“Animation”，然后选择“Mode Input”。

（3）演示代表静平衡状态的帧。在控制面板上选择“Animation”，然后选择“Include Static”，选择“Next Static”察看所有的静平衡状态位置。

（4）演示代表接触的帧。在控制面板上选择“Animation”，然后选择“Include Contacts”，继续选中“Next Contact”察看构件之间的所有接触。

4．追踪点的轨迹

在基于时间的动画过程中，可以在屏幕上描绘代表模型运动轨迹的点。这些有助于设计某些具有特殊运动规律的机械系统，了解机构是否按预期的方式运动。追踪点的轨迹对于包络线（面）的研究也非常有用，可以检查机械系统完成一个典型工作循环的过程中，是否有构件运动到特定的工作包络线（面）之外。在屏幕上勾画点的轨迹，需要定义一个以上的“marker”点来生成轨迹,ADAMS/PostProcessor 勾勒出通过“marker”点轨迹的曲线。

要在动画中追踪点的轨迹，首先在控制面板上选择“Animation”，然后在“Trace Marker”栏内输入要追踪轨迹的 Marker 点的名字。如果要在视窗内选择一个 marker 点，需用右键单击文字栏，然后从弹出的菜单内选择合适的命令。

5．重叠动画帧

可以将基于时间的连续动画帧重叠起来。当选择“Superimpose”切换按钮时，ADAMS/PostProcessor 将各动画帧重叠显示。在控制面板上选择“Animation”，然后选中

“Superimpose”即可。

6.3.5　频域动画的控制

1．在动画中显示特定模态和频率

（1）选择观察模态和频率。在控制面板上选择“Mode Shape Animation”，然后设置选项菜单为以下任一个：“Mode”并输入要使用的模态数字；“Frequency”并输入模态频率。如果指定的是输入频率，ADAMS/PostProcessor 将使用最接近该频率的模态。如果既没有指定模态也没有定义频率，ADAMS/PostProcessor 将使用模型变形的第一阶模态。

（2）使用滑动条演示动画中的画帧。在控制面板中选择“Mode Shape Animation”，然后执行以下任一步骤：单击并拖动最上端的滑动条直到达到指定模态和频率；在滑动条右端的文字输入栏输入指定模态和频率。

2．控制每次循环的画帧的数目

对于线性化模态形状动画，可以控制每次循环画帧的数目。在控制面板上选择“Mode Shape Animation”，在每次循环帧数“Frames Per Cycles”文字栏中填入每次循环将演示的帧数，然后演示动画即可。

3．设置线性化模态形状的显示

当演示频域动画时，可以设置构件从未变形位置开始平移或旋转变形比例的最大值，可以显示变形幅值是否随时间衰减，可以将一个模态重叠到另一个模态，还可以显示未变形的模型。在设置频域显示控制参数时，在控制面板上选择“Mode Shape Animation”，然后按需要选择表 6-6 所示的选项。

表 6-6　不同文件格式的输入数据形式

操作	功能
设置从未变形位置平移或旋转变形比例的最大值	在最大平移“Maximum Translation”和最大旋转“Maximum Rotation”栏中输入所需数据
显示时间衰减	选择显示时间衰减“Show time decay”
重叠模式	选择重叠“Superimpose”

4．察看特征值

可以在一个信息窗口中显示预测特征解所有特征值的信息。一旦在信息窗口中显示了该信息，就可以将其以文件的形式保存。这些信息包括：模态数——预测特征解的模态序号数；频率——相应于模态的自然频率；阻尼——模态的阻尼比；特征值——列出特征

值的实部和虚部。为察看特征值，从控制面板上选择特征值表“Table of Eigenvalues”，出现信息窗口，在察看了信息之后，选择关闭“Close”。

6.3.6 记录动画

可以将动画以一系列文件的形式保存下来，每份文件包含动画的一帧。ADAMS/PostProcessor 在当前工作目录保存文件。一旦录制下了动画，就可以采用其他多媒体工具进行编辑。

（1）在创建动画之前，可以选择格式有.avi，.tif，.jpg，.bmp，和.xpm（AVI 格式仅适用于 Windows）。

（2）给文件命名一个前缀。ADAMS/PostProcessor 将为该文件分配一个唯一的数字以形成该文件的名字。例如，定义一个“BLOCK”的前缀，以.tif 格式保存，则该文件名字为 BLOCK_001.tif、BLOCK_002.tif 等。如果没有定义文件名字，则前缀为 frame（如 frame_001.tif）。

（3）对于 AVI 格式，不压缩以保证图片质量，并设置关键画帧的间隔，默认情况下采用 1/5000 的压缩率。

（4）记录动画。在控制面板上，选择记录 ，并选择播放 。

（5）设置记录选项。在控制面板上选择“Record”，然后选择保存画帧的文件格式，在“Filename”文字栏输入文件名字的前缀，如果选择 AVI 格式，需设置每秒的画帧数目、压缩率，如有可能需设置关键画帧之间的间隔时间。

6.4 ADAMS/PostProcessor 绘制仿真曲线

将仿真结果用曲线图的形式表达出来，能让我们更深刻地了解模型的特性。ADAMS/PostProcessor 能够绘制仿真自动生成结果的曲线图，包括间隙检查等，还可将结果以定义的量度或需求绘制出来，甚至可以将输入的测试数据绘制成曲线。绘制出的曲线由数据点组成，每个数据点代表在仿真中每个输出步长上创建的输出点的数据。在创建了曲线之后，可以在曲线上进行后处理操作，比如通过信号处理进行数据过滤，以及数学运算等，也可以手动改变数值或者写表达式来定义曲线上的数值。

6.4.1 曲线图的类型

ADAMS 提供了由几种不同类型仿真结果绘制曲线图的功能。

1. 对象（Object）

模型中物体的特性，如某个构件的质心位置等。如果要察看物体的特性曲线图，必

须先运行 ADAMS/View 后再进入 ADAMS/PostProcessor，或者导入一个命令文件（.cmd）。

2．量度（Measure）

模型中可计量对象的特性，如施加在弹簧阻尼器上的力或物体之间的相互作用。也可以直接在 ADAMS 产品中创建量度，或者导入测试数据作为量度。要察看量度，需要先运行 ADAMS/View 后运行 ADAMS/PostProcessor，或导入一个模型和结果文件（.res）。

3．结果（Result）

ADAMS 在仿真过程中计算出的一套基本状态变量。ADAMS 在每个仿真输出步长上输出数据。一个结果的构成通常是以时间为横坐标的特定量（比如，构件的 x 方向位移或者铰链上 y 方向的力矩）。

4．请求（Request）

要求 ADAMS/Solver 输出的数据。可以得到要考察的位移、速度、加速度、或者力的信息。

5．系统模态

察看线性化仿真得到的离散特征值。

6．间隙分析

察看动画中的物体之间的最小距离。

6.4.2　曲线图的建立

在绘制曲线图模式下，用控制面板选择需要绘制的仿真结果。在选择了仿真结果以绘制曲线后，可以安排结果曲线的布局，包括增加必要的轴线、确定量度单位的标签、曲线的标题、描叙曲线数据的标注等。

1．控制面板的布局

绘制曲线图模式下的控制面板如图 6-7 所示。

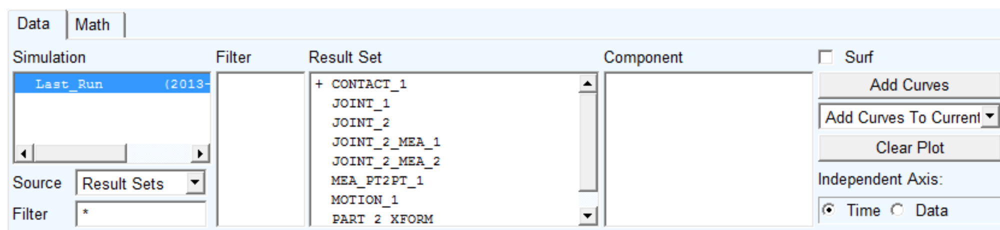


图 6-7　绘制曲线图模式下的控制面板

2．绘制物体特性曲线

物体特性的曲线可以直接绘制，而不必重新创建量度来绘制特性曲线，并可选择同时显示一条以上的特性曲线。绘制特性曲线，必须在运行 ADAMS/View 后进入 ADAMS/Post Processor 或者导入模型和结果。

绘制物体特性数据的曲线，在控制面板上设置“Source”为“Objects”，控制面板变成显示所有绘制曲线图时可用的结果。再选择要绘制特性曲线的模型，从“Object”菜单中选择要绘制特性的物体，“Object”菜单中包含了模型中所有构件的清单。从特性“Characteristic”菜单中选择要绘制曲线的特性，从分量“Component”菜单中选择一种或多种需要绘制特性的分量。选择“Add Curves”将数据曲线添加到当前曲线上。

3．绘制量度曲线

在控制面板上设置“Source”为“Measures”，控制面板变成显示所有绘制曲线图时可用的量度。再从“Simulation”菜单中选择一次仿真结果，该菜单中包含所有可以绘制成曲线的数据资源，当调入额外的仿真结果时也会添加到“Simulation”菜单中。选择想要绘制的量度，在控制面板上选择添加曲线“Add Curves”将曲线添加到当前页。

4．绘制请求或结果曲线

在控制面板上设置“Source”为请求（绘制请求的分量）或结果（绘制来自仿真结果的分量），控制面板变为显示所有绘制曲线图时可用的结果。再从“Simulation”菜单中选择一次仿真结果，该菜单中包含了所有可以创建曲线的数据资源，当调入额外的仿真结果时也会添加到“Simulation”菜单中。然后从“Result Set”或“Request”菜单中选择一个结果或者请求，再从“Component”菜单中选择要绘制的分量，并选择添加曲线“Add Curves”将数据曲线添加到当前曲线图。

5．绘制系统模态

在控制面板上设置“Source”为系统模态“System Modes”，然后从“Eigen”菜单中选择一个特征值，再选择“Add Curves”添加曲线。

6．查看测试数据

通过在“File”菜单中使用“Import”命令读入 ASCII 格式的文件，可以很方便地导入测试数据。ADAMS/PostProcessor 将测试数据以栏式文件的格式导入，并以量度的形式保存数据。一旦 ADAMS/PostProcessor 将测试数据以量度的形式导入，就可像其他形式的量度一样对其进行绘图、显示和修改。

7．快速浏览仿真结果

可以快速地浏览仿真结果而不用创建大量的曲线图页面。在控制面板的右端选择“Surf”，然后选择想要绘制的仿真结果，在做出选择后 ADAMS/PostProcessor 能够在当前页面上自动清除当前曲线而显示新的仿真结果。继续选择仿真结果就可以在同一张页面上陆续绘制不同的曲线，而不用不断生成新的页面。

8．在曲线图页面上添加多条曲线

可以在一个曲线图页面上添加多条曲线，也可以选择在每次添加曲线时创建一个新的曲线图页面，或者对每个不同的物体、请求和结果创建不同的曲线图页面。ADAMS/PostProcessor 允许将一个物体的速度、加速度和位移自动地绘制在一个曲线图页面上，

当针对不同的物体绘制曲线时可以设置 ADAMS/PostProcessor 自动为这些数据创建新的曲线图页面。

如果选择在当前曲线图页面上添加多条曲线，ADAMS/PostProcessor 将为每条新曲线分配不同的颜色和线型以便将不同曲线区分开来。对于所定义的颜色、线型和符号可以改变默认定义的属性。

ADAMS/PostProcessor 为每种单元类型创建一个纵坐标轴。例如，如果在同一个曲线图内绘制位移和速度两条曲线，ADAMS/PostProcessor 将自动地显示两个纵坐标轴（一个对应位移，一个对应速度）。

添加曲线时首先要选择需要绘制的结果，然后从位于添加曲线“Add Curves”下面的选项菜单中选择希望采用何种方式添加曲线，可以选择：

（1）Add Curves to Current Plot：添加曲线到当前曲线图页面上。

（2）One Curves Per Plot：在一张新页面上创建该曲线。

（3）One Plot Per Object，Request，Or Result：针对一项特定的物体、请求或结果创建一条新曲线（对于量度不可用）。

9．使用除时间值外的横坐标轴

曲线图中用于绘制横坐标轴的默认数据是仿真时间，也可选择除仿真时间外的其他数据作为横坐标轴。在控制面板右端横坐标轴区域选择“Data”，出现横坐标轴浏览器，然后选择想要作为横坐标轴的数据再选择“OK”。

6.4.3　曲线图上的数学计算

可以对任一曲线上的数据进行数学计算，这些操作包括：

（1）将一条曲线上的值与另一条曲线上的值进行加、减、乘运算。

（2）计算曲线数值的绝对值或对称值。

（3）对曲线上的值进行插值以创建一条均匀分布采样点的曲线。

（4）按特定比例将曲线进行缩放。

（5）按特定值平移曲线，平移曲线就是沿相应轴转换数据。

（6）将一条曲线与另一条曲线的开始点对齐，或者将曲线的开始点挪至零点，将曲线对齐有助于比较曲线上的数据。

（7）从曲线上的值创建样条曲线。

（8）手动改变曲线上的值。

（9）过滤曲线数据。

也可以在基于计算的基础上创建新的曲线，或者对所选操作的第一条曲线进行修改。

选择进行数学计算，ADAMS/PostProcessor 显示出曲线编辑工具栏，如图 6-8 所示。

切换是否显示曲线编辑工具栏的开关，需在“View”菜单中选择“Toolbars”，然后选择“Curve Edit Tool Bar”，曲线编辑工具栏就出现在窗口上端的主工具栏下面。

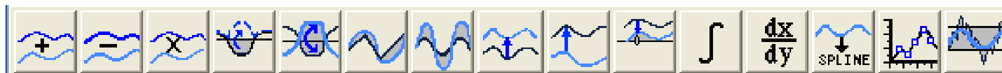


图 6-8 曲线编辑工具栏

1. 在曲线数据上进行简单的数学计算

通过在曲线上进行简单的数学计算可以对曲线进行修改，可以使用包含在另一条曲线中的值或重新指定一个值，进行操作的曲线必须属于同一个曲线图。如果想改变基于数值的曲线而不创建新的曲线，需在曲线编辑工具栏的最右端清空“Create New Curve”选项。ADAMS/PostProcessor 有时需要两条曲线完成这些操作而修改第一条曲线（如求减运算）。

将一条曲线的值与另一条曲线的进行加，减，乘。按照要进行的操作在曲线编辑工具栏中选择工具，如曲线数据相加“Add Curve Data”、曲线数据相减“Subtract Curve Data”或曲线数据相乘“Multiply Curve Data”。然后选择要被加，减，乘的曲线，再选择第二条曲线。

找出数据点绝对值或对称点。在曲线编辑工具栏中选择将要进行操作的工具，如绝对值工具“Absolute Value”，或找对称点工具“Negate”。然后选择一条曲线进行操作。

产生采样点均匀分布的曲线（曲线插值）。在曲线编辑工具栏中选择曲线采样工具“Curve Sampling”，然后从工具栏右端的选项菜单中选择用于插值的样条曲线类型，继而输入需要生成的插值点的数目（默认的为 1024，必须输入一个正整数）再选择需要进行操作的曲线。

按特定值缩放或平移曲线。在曲线编辑工具栏选择缩放工具“Scale”或平移工具“Offset”，然后在曲线编辑工具栏右端出现的文字栏中输入缩放或平移值，再选择需要进行操作的曲线。

将一条曲线与另一条曲线的开始点对齐。在曲线编辑工具栏中选择“Align Curve to Curve”工具，然后选择要对齐的曲线，再选择第二条曲线。

将曲线的开始点移至零点。在曲线编辑工具栏中选择“Align Curve to Zero”工具，然后选择需要进行操作的曲线。

2. 计算曲线的积分或微分

可进行已存在数据点的积分和微分操作。在曲线编辑工具栏中选择积分工具“Integrate”或微分工具“Differential”，然后选择要进行该运算的曲线，再选择第二条曲线。

3. 由曲线生成样条

可从一条曲线上提取数据点，然后由这些点生成样条。在曲线编辑工具栏中选择样

条工具“Spline”，在出现于曲线编辑工具栏左边的样条名称文本框中输入样条的取名，然后选择曲线即可由曲线生成样条。

4．手工修改数据点数值

对于已经生成的任何曲线都可手工修改数据点的数值，手工修改数据点的数值时各顶点处的点以高亮显示。首先选择需要高亮显示的曲线，然后在特性编辑器中设置移动数据点的方向为水平、垂直还是任意方向，再将光标置于高亮显示的点上将其拖动到所需位置。

6.5 曲线图的处理

ADAMS/PostProcessor 提供了若干对曲线图进行处理的工具，包括进行滤波以消除噪声信号、进行快速傅里叶变换和生成博德图等。

6.5.1　曲线数据滤波

对曲线数据进行滤波操作可以消除时域信号中的噪声，或者强调时域信号中特定的频域分量。ADAMS/PostProcessor 提供两种类型的滤波，一种是由 The Math Works 公司开发的 MATLAB 软件中采用的 Butterworth 滤波，另一种是直接指定传递函数。

1．ADAMS/PostProcessor 提供两种滤波的方法

（1）连续滤波。将时域信号通过快速傅里叶变换转化到频域，然后将结果函数与滤波函数相乘，再进行逆傅里叶变换。

（2）离散（数值）滤波。直接针对时域信号进行离散滤波操作，这时在某一特定时间步长上滤波后的信号是由前面的输入、输出信号和离散传递函数经计算得到的。

2．产生滤波函数

采用曲线编辑工具栏，可产生滤波函数。

（1）产生 Butterworth 滤波函数。先从曲线编辑工具栏中选择曲线滤波工具，在 Filter Name 文本框中单击鼠标右键后选择 Filter Function – Creat，进入产生滤波函数对话框，然后在对话框中键入滤波的名字，选择 Butterworth 滤波，并选择滤波的方法是连续的还是离散的，是低通、高通、带通还是带阻，还要指定滤波阶数以及阻断频率。

（2）产生基于传递函数方式的滤波函数。同样先从曲线编辑工具栏中选择曲线滤波工具，在 Filter Name 文本框中单击鼠标右键后选择 Filter Function – Creat，进入产生滤波函数对话框后在对话框中键入滤波的名字，并选择 Transfer Function 滤波，然后选择滤波的方法是连续的还是离散的，还要指定传递函数分子、分母的系数，系数可直接输入数值，或者由 Butterworth 滤波转换生成。还可利用检查格式和生成曲线图

按钮来检查格式、生成增益和相位的曲线图。

3．执行滤波函数

生成滤波函数后即可对滤波曲线进行滤波操作，先选择需要滤波的曲线，再从曲线编辑工具栏中选择曲线滤波工具，然后在滤波名称文本框内输入要采用的滤波函数的名称，并通过名称文本框后面的复选框选择是否执行 0 相位操作。

6.5.2 快速傅里叶变换

快速傅里叶变换（FFT）是一种有效的数学算法，可将时域函数映射到正弦分量。FFT 在模型中以时间为自变量，可将函数转换为频域形式，分离出以正弦分量表达的频率成分。

1．FFT 表示法

ADAMS/PostProcessor 包含三种表示频域数据的方法：FFTMAG、FFTPHASE 和 PSD（Power Spectral Density）。

（1）**FFTMAG**：FFTMAG 确定 FFT 算法返回复数值的绝对值的大小，ADAMS/PostProcessor 以频率为自变量 x 轴、以复数值大小为 y 轴绘制出频率数据的左半边频谱，而右半边频谱是左半边的镜像。

（2）**FFTPHASE**：FFTPHASE 确定标准 FFT 算法返回复数值的相位角，在给定频率处给出时域数据中等效正弦函数表达的相位差。

（3）**PSD**（**Power Spectral Density**）：任何基于时间的模型信号在时域和频域中都有相同的总功率，在谱分析中感兴趣的就是在频率间隔中所包含功率的分布，PSD 表达的就是信号在其频率成分上的功率分布。PSD 曲线通常看上去和 FFTMAG 曲线相似，但具有不同比例。

2．Window 函数

FFT 算法假定时域数据是来自连续无限数据系列中的周期性样本，开始和结束的条件假定是能够匹配的。Window 函数能过滤掉因为开始和结束的条件不匹配而引起的不连续，并确保 FFT 的周期性。Window 函数类似于单位阶跃输入，能保持 FFT 输出的幅值，但容许微小的不连续。Window 函数趋向于减小峰值频率幅值的准确性，也可以类似地显著减少因为终点条件不连续而引起的负面影响。

采用何种 Window 函数应根据实际情况确定，可供选用的 Window 函数有矩形、三角、Hanning、Hamming、Welch、Parzen、Bartlett、Blackman 等。

3．构造 FFT 曲线

选择要进行信号处理的曲线，再从“Plot”菜单中选择 FFT，于是出现 FFT 对话框。选择要使用的 window 函数类型，输入要进行信号处理曲线的开始时间和结束时间，指明插值点的数目（点的数目必须为正整数），并将 y 轴设置为 MAG，Phase，或者 PSD，然

后选择 Apply 执行 FFT 操作。

6.5.3　生成博德图

博德图提供了一种研究线性系统频率响应函数（FRF）及对非线性系统进行线性化的工具。频率响应函数测量的是采用不同频率单位简谐振动作为输入时的输出响应。博德图可以显示线型系统所有输入输出组合的幅值增益和输入输出间的相位差。

1．构造博德图的方法

ADAMS/PostProcessor 提供 3 种构造博德图的方法，主要是基于线性系统的不同表达方式。这 3 种方法是传递函数表达、线性状态空间矩阵（A、B、C、D 矩阵）表达和输入输出对表达。

2．生成博德图

从“Plot”菜单中选择 Bode Plots，于是出现博德图对话框。在对话框中选择不同的输入类型，对话框根据不同输入类型又要求输入不同的数据，数据输入完成后单击 OK 按钮生成博德图。

6.6　实例——汽车的前悬架系统运动仿真

ADAMS/PostProcessor 应用于生成曲线图及其数据统计和数据处理时十分方便。下面介绍对一个简单多体动力学模型进行振动分析后，采用 ADAMS/PostProcessor 进行数据的后处理、研究仿真分析结果的实例。

6.6.1　动力学模型的建立和仿真分析

创建一个简单多体动力学模型，其拓扑结构如图 6-9 所示。这个模型可用来模拟一个汽车的前悬架系统，用于车辆平顺性的研究。

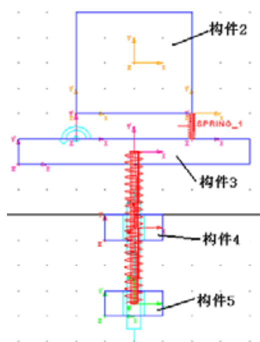


图 6-9　模型结构图

模型包括 4 个构件：构件 2、3、4、5（构件 1 为地面，其他分别相当于汽车驾驶室、车架、车桥和轮胎）。生成各构件后需定义各构件质量、转动惯量、质心位置等物理信息。然后定义构件之间的约束关系和力，构件 2 与构件 3 的前端为旋转铰链连接，其他相邻构件间有平移铰链或共面约束连接以保证整个系统在同一平面内运动，构件 2 与 3、3 与 4、4 与 5 间作用有移动的弹簧阻尼器（分别相当于驾驶室旋置刚度、悬架刚度和轮胎刚度）。另外在构件 5 下端作用有一个驱动约束的激励（相当于路面不平度激励）。

模型建立之后进行仿真，在仿真控制对话框中设定仿真时间和步数，并在 Start at equilibrium 栏前复选框上选择在仿真前执行静平衡分析和使仿真从平衡位置开始。仿真后得到结果，然后采用 ADAMS/PostProcessor 工具进行结果分析，有助于将仿真分析的数值结果与实际物理量的物理意义结合起来。

6.6.2 采用 ADAMS/PostProcessor 生成曲线图

在完成建模与仿真分析后，在 ADAMS/View 的主工具栏中按下 钮，进入 ADAMS/PostProcessor 的界面，即可进行后处理建立曲线图并对其进行设置，以便更好地研究仿真结果、预测产品性能。

1. 创建曲线图的页面布局

在创建曲线之前可以设置页面布局，默认的页面布局为该页上只有一张曲线图，如有需要可将其设置为一页上有多个曲线图。这时需在页面布局工具栏“Page Layout”里选择相应的页面布局形式，页面布局工具栏为一个下拉式的工具栏，鼠标右键单击后可以展开，然后选择所需的布局形式。例如，要生成具有四张曲线图的页面，就选择 。这样生成的页面布局如图 6-10 所示。

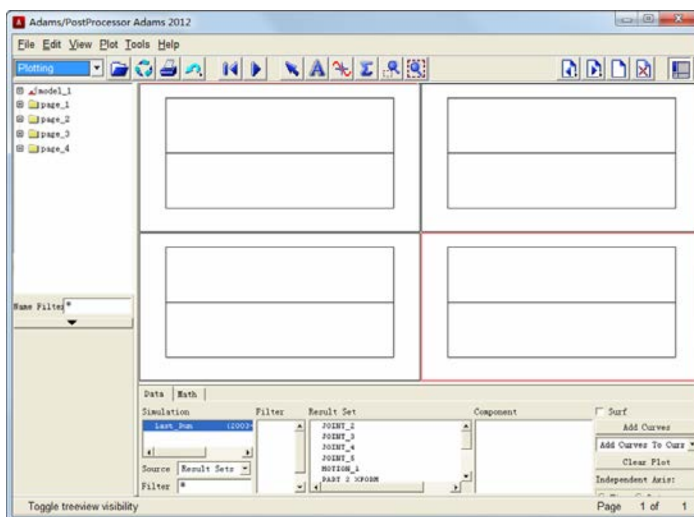


图 6-10 创建新曲线图

2．生成曲线

本实例如用来研究汽车平顺性的问题，一般较为关心的是驾驶室（构件 2）质心处垂直方向的加速度，需要绘制构件 2 质心处垂直方向加速度的曲线。这时依次在“Simulation”栏中选中“Last_run”，在“Source”栏中选中“Result Sets”，在“Result Set”栏中选中“PART_2_XFORM”，在“Component”栏中选中“ACCY”，然后按下“Add Curves”按钮，就可得出质心处竖直方向的加速度，如图 6-11 所示。采用同样的方法还可以得到所关心的任何部件位移、速度、加速度等的曲线。

3．增加曲线

有时需要将不同曲线放在同一张曲线图中，对两者所反映的性能进行对比研究，就需要在已生成的曲线图中添加另一条曲线。这时保留第一条曲线（不按“Clear Plot”按钮将其清除），然后再生成第二条曲线并添加进来即可。生成第二条曲线的方法与第一条相同，也是在“Source”栏中选中“Result Sets”，再选中“PART_2_XFORM”，在“Component”栏中选中“ACCX”，然后按下“Add Curves”按钮。如本例中将水平方向加速度与垂直方向加速度画在同一个图中，如图 6-12 所示。采用同样方法还可以在同一张曲线图中添加更多曲线。

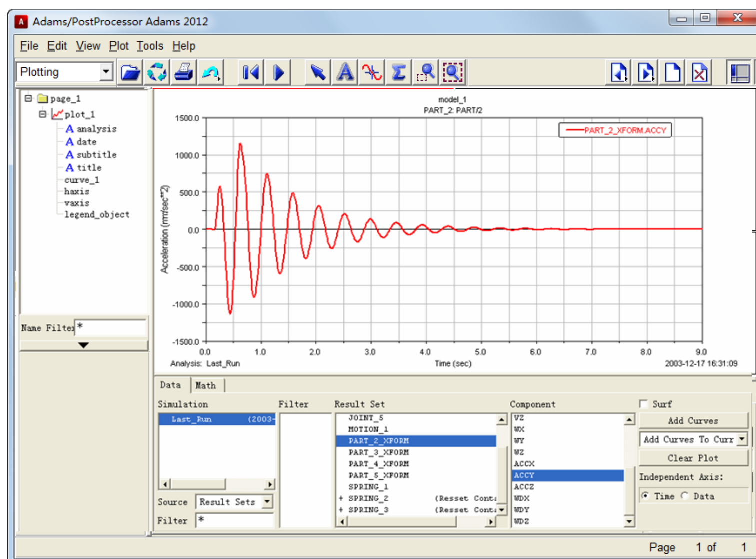


图 6-11　曲线绘制图

4．改变曲线颜色和曲线线型

如果需要更清晰地显示曲线图，可以改变曲线的颜色和线型。首先要在目录树中单击 page_*前的“+”号，展开页面中的各个曲线图，然后在目录树中单击 plot_*前的“+”号，可以展开曲线图中的各条曲线。在其中选择需要改变属性的曲线 curve-*，可以同时选择一条或多条曲线。如果已经选中了曲线，编辑区中就会出现可修改的各项属性，如曲线颜色、线型、线宽、高亮点等。通过对编辑区中各项属性的设置，可以对图

象属性进行修改，如在编辑区的线型“Line Style”对话框里选择“Dash”，曲线就由实线改变成虚线。

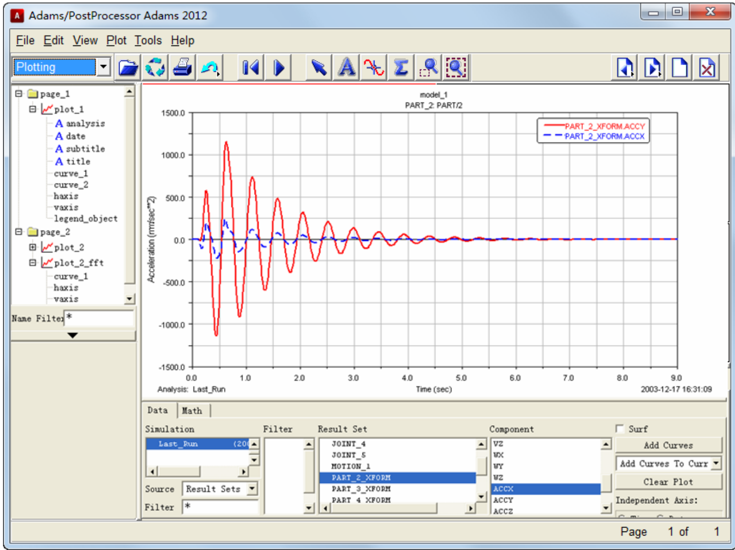


图 6-12　添加曲线图

6.6.3　采用 ADAMS/PostProcessor 操作曲线图

对于所生成的曲线图，有时需要进行一些特殊操作。如在汽车平顺性研究中经常需要对时域数据进行快速傅里叶变换（FFT）以转化到频域，通过频域的特性能够更直观地了解汽车振动能量的频率分布、掌握系统的振动特性。

具体操作中，在菜单的“Plot”选项下选中“FFT…”，出现图 6-13 所示的对话框。

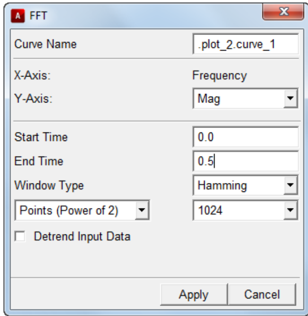


图 6-13　FFT 对话框

参考前面关于 FFT 的章节对其进行设置，然后选择“Apply”按钮。最后得到上面垂直加速度的 FFT 曲线，如图 6-14 所示。

由 FFT 图可以分析，如上述加速度的频率特性中谱密度幅值的峰值发生在 2—4Hz 处，

据此可以分析研究模型所模拟的汽车系统的其他性能。

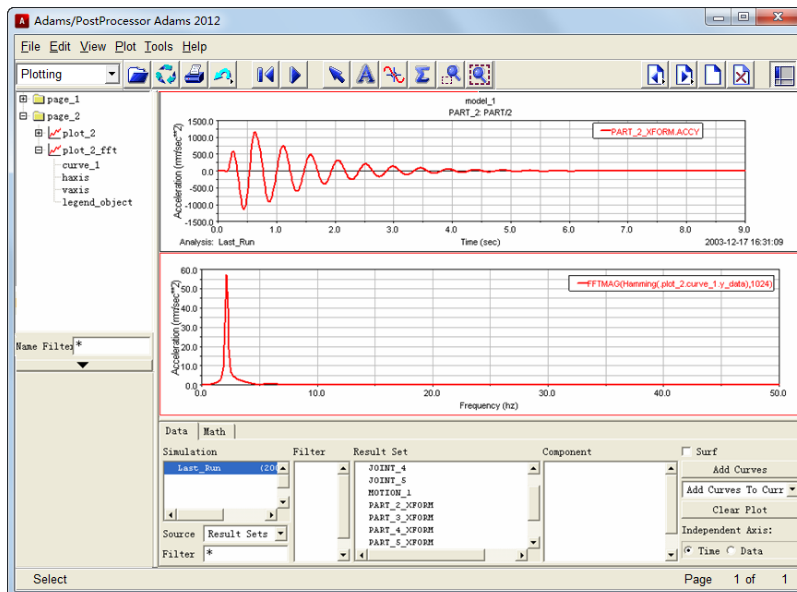


图 6-14　FFT 曲线图

第 7 章

建模与仿真实例

本章将主要通过一些实例详细讲解在 ADAMS 中建立模型并进行仿真的过程。实例主要有：曲柄连杆、单摆、凸轮、弹簧阻尼器等基本机构的建模与仿真，石块自由落体和投掷过程的模拟，以及起重机等复杂模型的建立与仿真。

学习要点

- 曲柄连杆机构和单摆机构
- 凸轮机构
- 自由降落的石块和投射石块
- 斜面上的滑块
- 起重机和弹簧阻尼器

7.1 曲柄连杆机构

本实例主要分为以下几个步骤：

（1）建立模型，设置单位和重力。

（2）建立零件和链接。

（3）建立和运行仿真。

（4）绘制结果。

曲柄连杆机构如图 7-1 所示，曲柄 *AC* 长 90mm，*OC* 距离 300mm。计算 $\beta=30^{\circ}$ 时的 $\dot{r},\ddot{r},\dot{\theta},\ddot{\theta}$ 。

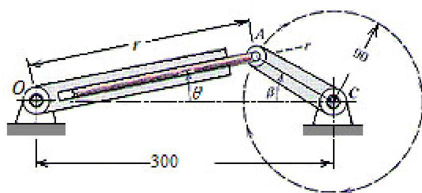


图 7-1　曲柄连杆机构

通过 ADAMS/View 将建立图 7-2 所示的模型。

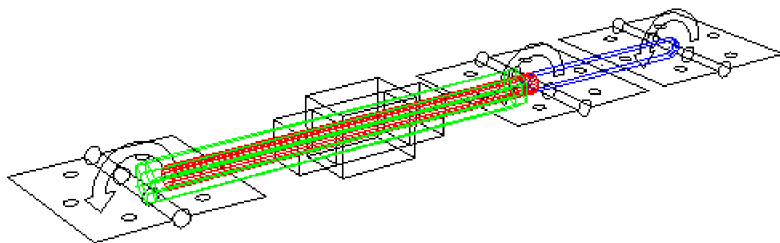


图 7-2　曲柄连杆模型

7.1.1　运行 ADAMS

（1）通过“开始”→“所有程序”运行 Adams-View 2012，或直接双击桌面上的快捷方式 Adams - View 2012，运行 ADAMS 2012。

（2）出现 ADAMS 开始界面，如图 7-3 所示。

（3）选择 New Model 单选项，打开“Create New Model”对话框。确认 Gravity（重力）文本框中是 Earth Normal（-Global Y），Units（单位）文本框中是 MMKS-mm，kg，N，s，deg。确认后单击“OK”按钮。

（4）创建新模型后，在 ADAMS/View 工作窗口的左上角显示有模型的名称。如果

ADAMS/View 中没有默认设置为经典界面，请单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，可以将界面切换为经典界面。

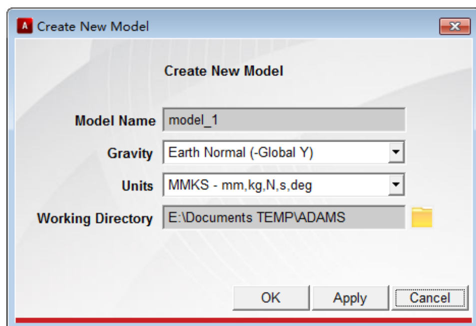


图 7-3　开始界面

7.1.2　设置建模环境

（1）系统打开 ADAMS 操作界面。在 Settings 下拉菜单中选择 Working Grid…，如图 7-4 所示。

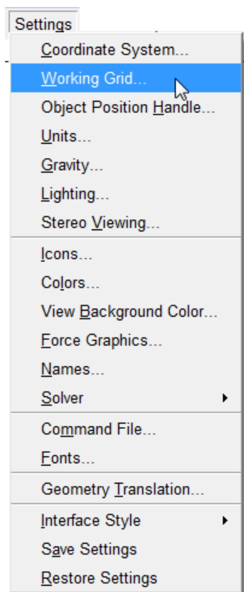


图 7-4　Settings 下拉菜单

（2）系统打开参数设置对话框，Size 栏的 X 和 Y 项都输入 300mm。

（3）在 Spacing 栏的 X 和 Y 项都输入 5mm，如图 7-5 所示。确认后单击“OK”按钮。

（4）单击工具栏中的选择按钮。

（5）单击缩放图标，上下移动鼠标使栅格占据整个屏幕。

（6）在 ADAMS 顶部的 View 菜单中选择 Coordinate Window，如图 7-6 所示。在屏

幕右下角弹出坐标显示框，如图 7-7 所示，随时显示鼠标的位置。

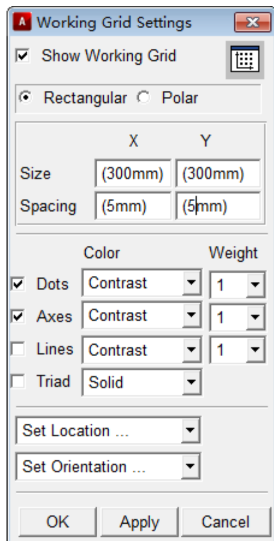


图 7-5　设置栅格

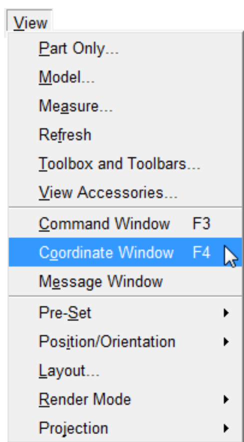


图 7-6　View 菜单

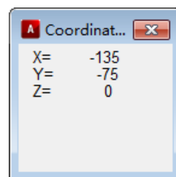


图 7-7　坐标框

7.1.3　几何建模

（1）用鼠标右键单击工具箱中的连接图标，弹出级联图标。

（2）用鼠标左键单击连接图标。

（3）在工具箱下方 Link 下拉文本框中选择 New Part，如图 7-8 所示。

（4）选中 Length 前面的复选标记，并在下面的文本框中输入 9cm，即曲柄的长度。

（5）在屏幕上用鼠标单击（0，0，0）和任一点绘制曲柄，如图 7-9 所示。

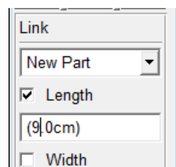


图 7-8　输入参数值

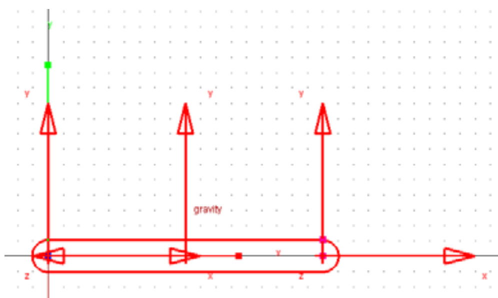


图 7-9　绘制曲柄

（6）若要调整曲柄的长度尺寸参数，可以用鼠标右键单击曲柄的右端标记点 marker_2 弹出快捷菜单，选择 Marker_2 中的 Modify，系统打开标记点修改对话框，然后输入修改值，如图 7-10 所示。

（7）用鼠标右键单击工具箱中的连接图标，弹出级联图标。

（8）用鼠标左键单击回转件图标。

（9）在工具箱下方 Link 下拉文本框中选择 New Part，如图 7-8 所示。

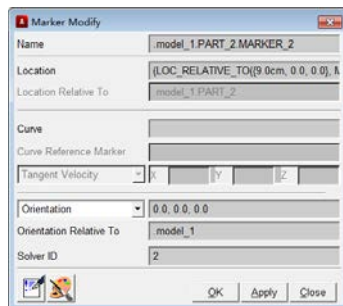


图 7-10　修改参数值

（10）用鼠标左键分别在屏幕上（0，0，0）处和（-120，0，0）处单击，建立回转中心线。

（11）用鼠标分别在（0，5，0），（0，10，0），（-210，10，0），（-210，5，0），（0，5，0）绘制出圆柱体的轮廓。如果 ADAMS/View 设置了自动捕捉，难以精确定位时，按住 Ctrl 键再用鼠标单击以上各点。

（12）绘制完成以上各点后，单击鼠标右键完成圆柱体，如图 7-11 所示。

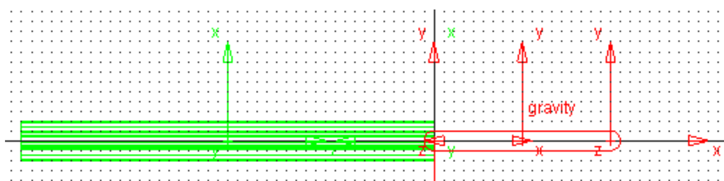


图 7-11　滑块建模

（13）用鼠标右键单击工具箱中的连接图标，弹出级联图标。

（14）用鼠标左键单击圆柱图标。

（15）在工具箱下方 Link 下拉文本框中选择 New Part。

（16）分别选中工具箱下方的 length 和 radius，设置圆柱体的长度和半径分别为 21cm 和 0.5cm，如图 7-12 所示。

（17）用鼠标单击（0，0，0），并在（0，0，0）左侧单击，活塞部分自动生成，如图 7-13 所示。

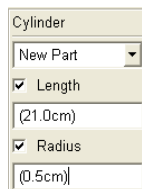


图 7-12　输入参数值

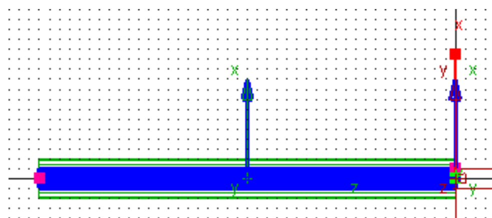


图 7-13　活塞建模

7.1.4　建立约束

（1）用鼠标右键单击工具栏中的铰接图标，弹出级联图标。

（2）用鼠标左键单击铰接图标。

（3）在工具箱下方的 Constrcution 下拉列表框中选择 1 Location 和 Normal To Grid，如图 7-14 所示。

（4）鼠标单击曲柄的右端点（90，0，0）。

（5）生成一铰接件，如图 7-15 所示。

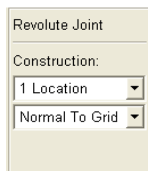


图 7-14　输入参数值

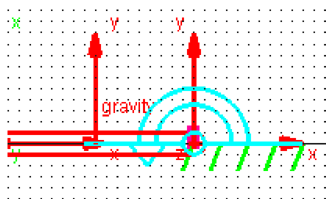


图 7-15　铰接建模

（6）重复步骤（1）、（2），在（-210，0，0）处也建立一铰接件，如图 7-16 所示。

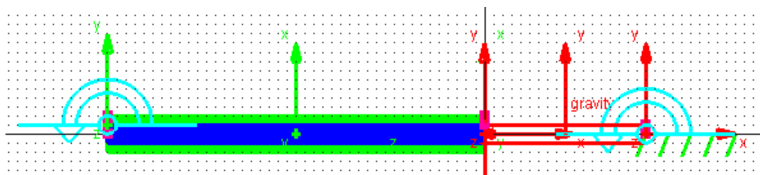


图 7-16　铰接建模

（7）由于在（-210，0，0）处有两个零部件（滑块和活塞），为了让铰接件只连接大地和滑块，用鼠标右键单击新建的铰接件，在打开的右键快捷菜单中选择 Modify，如图 7-17 所示。系统打开铰接件修改对话框，如图 7-18 所示。确认 First Body 为 PART_3，Second Body 为 ground。

下面在两个部件间建立铰接。

（8）重复步骤（1）和（2）。

（9）在工具箱下方的 Constrcution 下拉列表框中选择 2 Body－1 Loc 和 Normal To Grid，如图 7-19 所示。

（10）先用鼠标单击曲柄，再单击活塞，然后单击两者结合处，完成铰接件，如图 7-20 所示。

（11）重复步骤（7），确认新建的铰接件连接曲柄（part_2）和活塞（part_4）。

（12）用鼠标右键单击工具栏中的铰接图标，弹出级联图标。

（13）用鼠标左键单击棱柱副图标。

（14）确认在工具箱下方的 Constrcution 文本框中显示 2 Bod－1 Loc 和 Pick Feature，如图 7-21 所示。

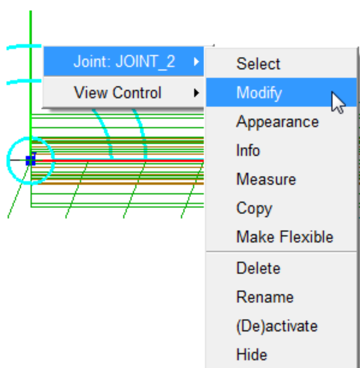


图 7-17　右键快捷菜单

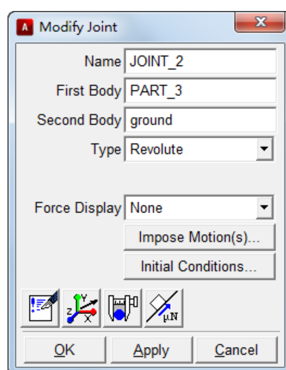


图 7-18　修改铰接

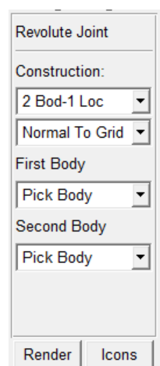


图 7-19　输入参数值

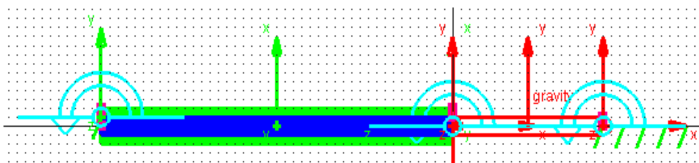


图 7-20　铰接建模

（15）单击活塞和滑块确定相对运动的部件。因为两者有重叠部分，选择活塞时，可以在活塞位置处单击鼠标右键，在弹出的菜单选项中选择 PART_4，如图 7-22 所示。同样，在选择滑块时，也可以在滑块位置处单击鼠标右键，并选择 PART_3，如图 7-23 所示。



图 7-21　输入参数值



图 7-22　右键快捷菜单



图 7-23　右键快捷菜单

（16）在滑块中心位置单击鼠标，确定运动副位置。

（17）移动鼠标使箭头呈水平方向，确定运动方向。

（18）完成平移运动副，如图 7-24 所示。

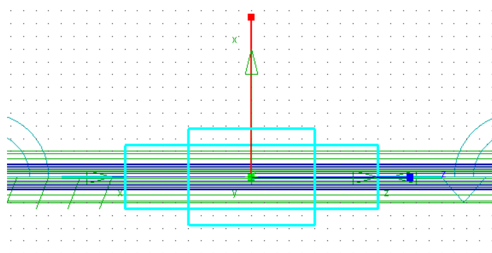


图 7-24　平移运动副建模

7.1.5　设置初始状态

现在所有的部件都已建立，约束也已经添加完毕，接下来指定曲柄的旋转速度。

（1）在工具箱中选择旋转铰运动。

（2）系统打开参数设置对话框在 Speed 栏输入 60r，设置曲柄转动速度为每秒 60 弧度，如图 7-25 所示。

（3）单击曲柄右侧的铰接副产生该运动，如图 7-26 所示。

（4）在该铰接副位置处出现一较大的运动方向箭头，如图 7-27 所示。



图 7-25　设置参数

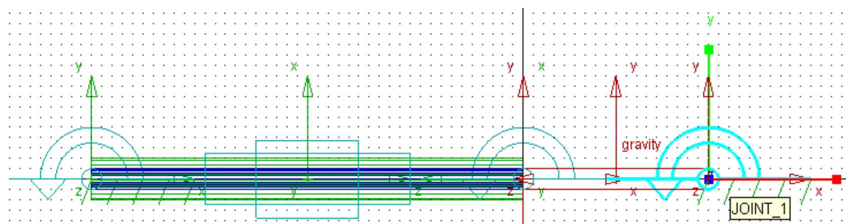


图 7-26　产生旋转运动

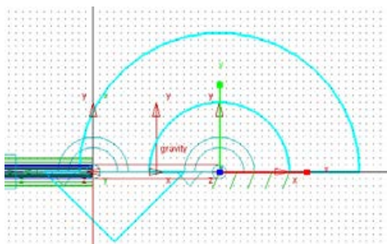


图 7-27　旋转运动建模

7.1.6　进行仿真

（1）在工具箱中单击仿真控制图标。

（2）系统打开参数设置对话框，设置 End Time 为 0.008726（即旋转 300 的时间，pi/6/60=0.008726），Steps 为 100，如图 7-28 所示。

（3）单击开始仿真图标。

（4）模型开始运动，到了结束时间运动结束，如图 7-29 所示。



提示

如果曲柄逆时针转动，对旋转运动（Motion_1）单击鼠标右键，选择 Modify，在

Function（Time）一栏的数据前面加上“-”。单击“OK”按钮重新仿真。

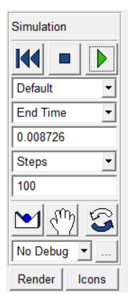
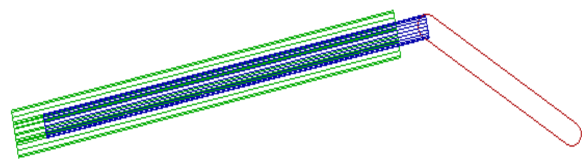


图 7-28　设置参数


图 7-29　运动仿真

📖7.1.7　测量仿真结果

（1）在 ADAMS 窗口上方的 Build 菜单中选择“Measure → Point to Point → New”，如图 7-30 所示。

（2）系统打开参数设置对话框，如图 7-31 所示。为测量输入一个名字，如 rdot。在 To Point 栏中输入“MARKER_8”，即滑块左侧铰接点处大地的标记点；在 From Point 栏中输入“MARKER_10”，即曲柄与活塞的连接点。

（3）在 Characteristic 栏选择 Translationl velocity 以测量其速度。

（4）选择 Cylindrical（圆柱）坐标系，并选择 R 选项。

（5）设置完毕单击 Apply 按钮，弹出测量窗口，如图 7-32 所示。

（6）重复（1）～（3）步骤新建测量 r_doubledot，在 Characteristic 栏选择 Translation acceleration 以测量加速度，测量结果如图 7-33 所示。

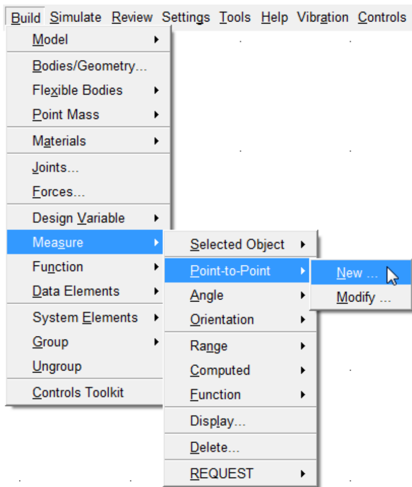


图 7-30　Build菜单

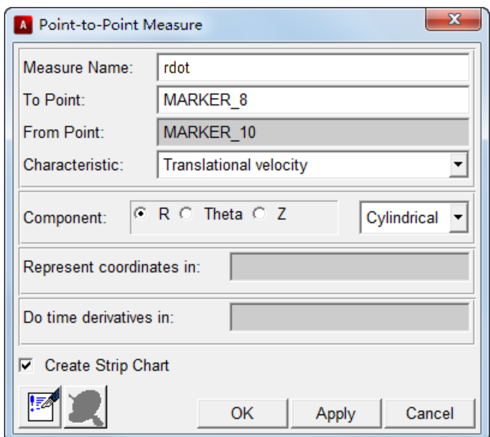


图 7-31　测量rdot

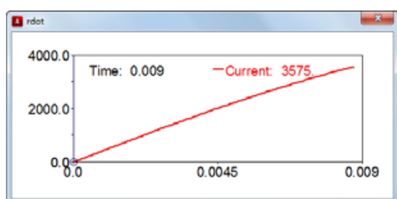


图 7-32　rdot 测量曲线

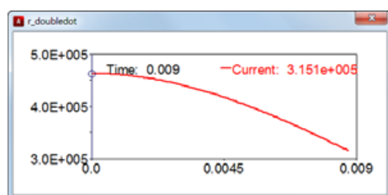


图 7-33　r_doubledot 测量曲线

（7）重复（1）～（3）步骤新建测量 theta_dot，在 Characteristic 栏选择 Translation velocity 测量速度以及 theta 选项，测量结果如图 7-34 所示。

（8）重复（1）～（3）步骤新建测量 theta_doubledot，在 Characteristic 栏选择 Translation acceleration 测量加速度以及 theta 选项，测量结果如图 7-35 所示。

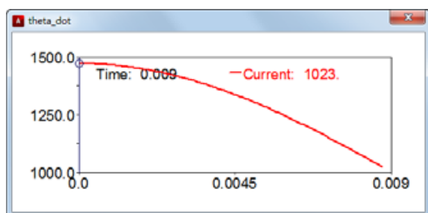


图 7-34　theta_dot 测量曲线

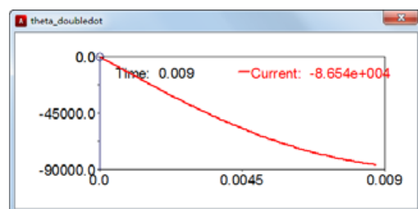


图 7-35　theta_doubledot 测量曲线

用鼠标右键单击每个测量窗口，选择“transfer to full plot”命令，进入 ADAMS/PostProcessor 窗口，放大整个测量曲线，单击 Plot Tracking 图标可以得到在不同时刻各测量点的精确数值。通过该仿真曲线，可以得到：

■　rdot=3.575m/s （注意图中的单位是 mm/sec），如图 7-36 所示。

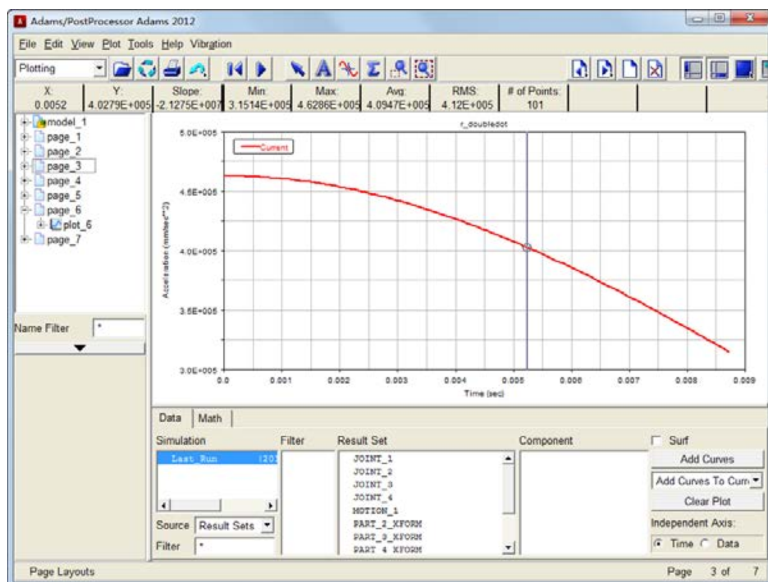


图 7-36　rdot 测量曲线

■ r_doubledot =315.11m/s^2，如图 7-37 所示。

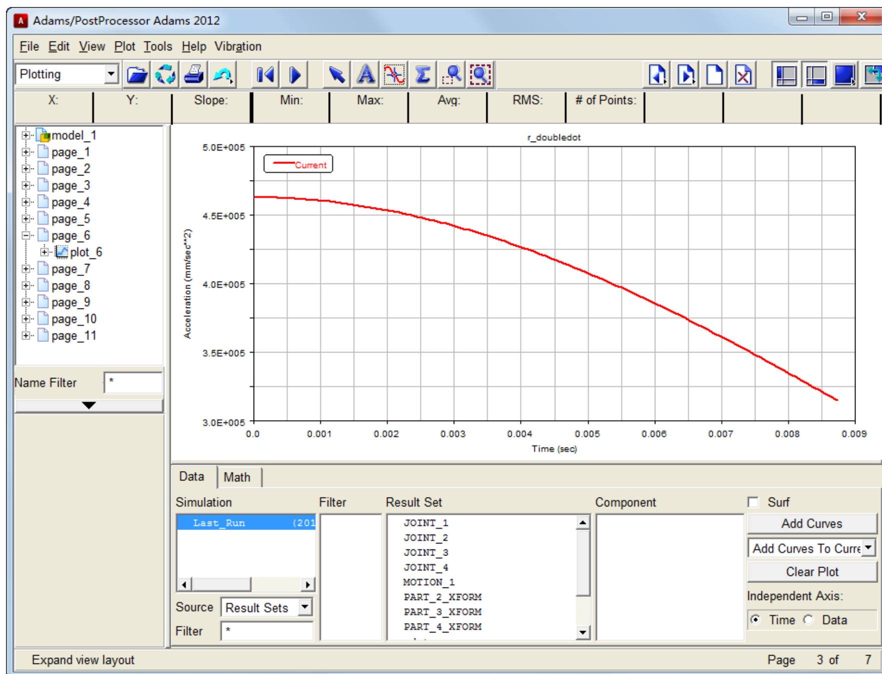


图 7-37 r_doubledot 测量曲线

■ theta_dot=1023.4 deg/second=17.86 rad/s，如图 7-38 所示。

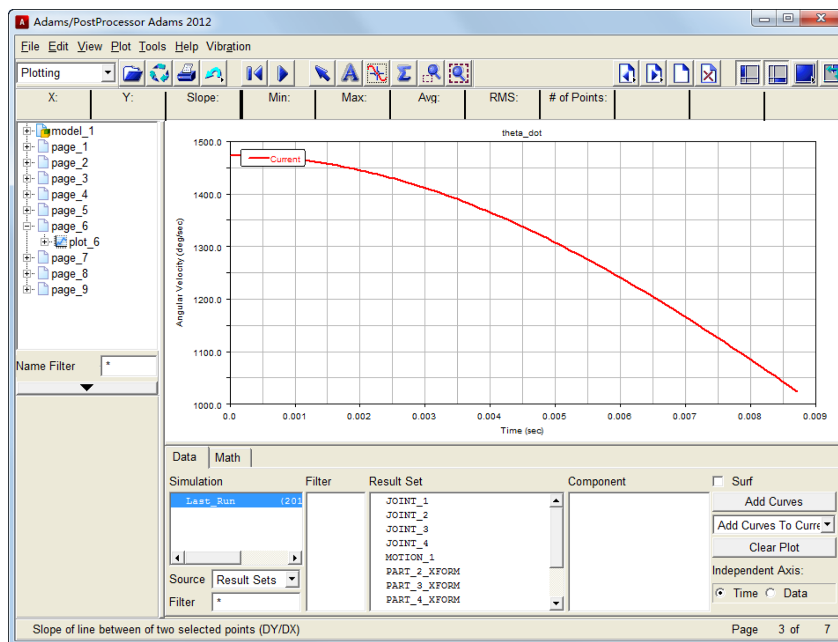


图 7-38 theta_dot 测量曲线

■ theta_doubledot=-86542.26 deg/s=-1510.45 rad/s，如图 7-39 所示。

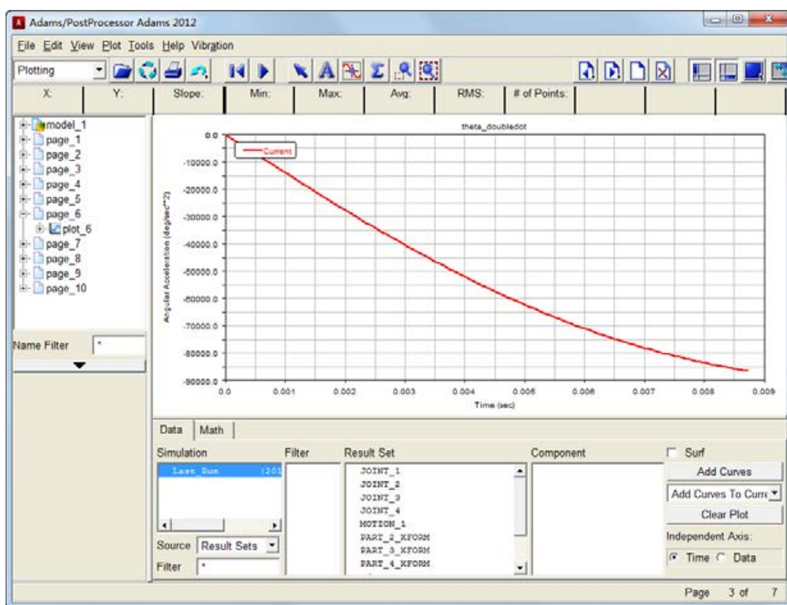


图 7-39　theta_doubledot 测量曲线

7.2 单摆机构

本实例主要分为以下几个步骤：

（1）建立实体模型。

（2）建立链接。

（3）建立和运行仿真。

（4）分析结果。

单摆结构如图 7-40 所示，*AB* 为匀质杆，质量 2kg，长 450mm，*A* 点固定，在垂直平面内摆动，当 $\theta = 30^0$ 时角速度为 $3\ \mathrm{rad/s}$，求此时 *A* 点的支撑力。

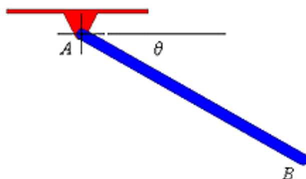


图 7-40　单摆结构图

7.2.1　运行 ADAMS

（1）通过“开始”→“所有程序”运行 Adams-View 2012，或直接双击桌面上的快

捷方式 Adams - View 2012，运行 ADAMS 2012。

（2）出现 ADAMS 开始界面。

（3）选择 New Model，打开“Create New Model”对话框。

（4）确认 Gravity（重力）文本框中是 Earth Normal（-Global Y），Units（单位）文本框中是 MMKS-mm，kg，N，s，deg，如图 7-41 所示。确认后单击“OK”按钮。

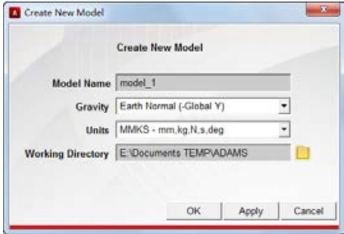


图 7-41　开始界面

（5）创建新模型后，在 ADAMS/View 工作窗口的左上角显示有模型的名称。如果 ADAMS/View 中没有默认设置为经典界面，请单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，可以将界面切换为经典界面。

（6）在 Settings 下拉菜单中选择 Working Grid…，如图 7-42 所示。系统打开参数设置对话框，如图 7-43 所示，在 Spacing 栏的 X 和 Y 项都输入 25mm。

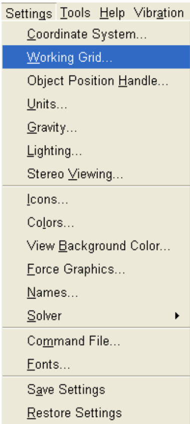


图 7-42　Settings 下拉菜单

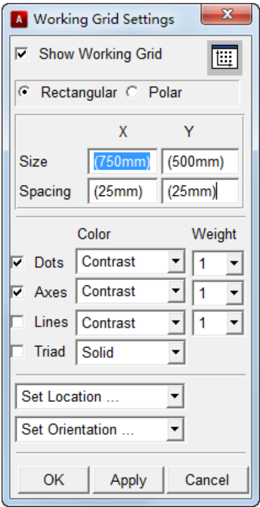


图 7-43　参数设置对话框

7.2.2　建立摆臂

（1）用鼠标右键单击工具箱中的连接图标，弹出级联图标。

（2）用鼠标左键单击连接图标。

（3）系统打开参数设置对话框，如图 7-44 所示，确认在工具箱下方文本框中显示 New Part。

（4）选中 Length 选项，输入 45.0cm，即摆臂长度。

（5）选中 Width 选项，输入 2.0cm。

（6）选中 Depth 选项，输入 2.75cm。

（7）单击 F4 键打开坐标框，鼠标单击（-225.0.0）作为摆臂的左侧起点，然后单击右侧水平方向任一点，ADAMS 自动生成摆臂，如图 7-45 所示。

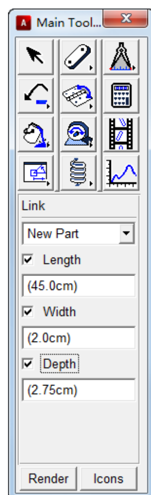


图 7-44　参数设置对话框

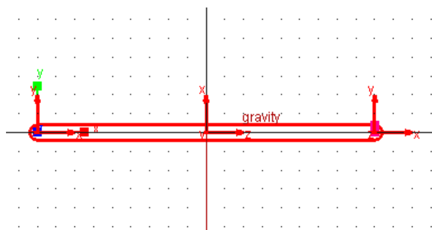


图 7-45　摆臂

7.2.3　设置摆臂质量

设置质量，既可以通过给出材料和尺寸让 ADAMS 自动计算，也可以手动给出。

（1）鼠标右键单击摆臂 Part_2，在打开的右键快捷菜单中选择 Modify，弹出修改对话框，如图 7-46 所示。

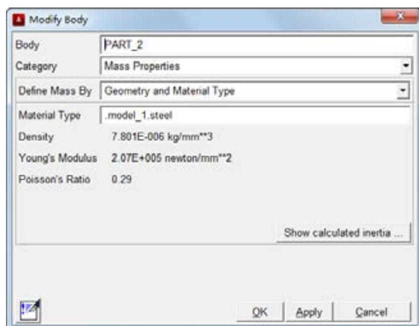


图 7-46　设置摆臂质量

（2）在 Define Mass By 栏选择 User Input。

（3）在 Mass（质量）栏输入 2.0。

（4）输入完毕单击“OK”按钮。

7.2.4 设置摆臂位置

（1）在工具箱中选择定位图标。

（2）打开参数设置对话框，如图 7-47 所示，在 Angle 栏输入 30，此时摆臂高亮显示。

（3）单击顺时针箭头，摆臂转向与水平方向成 30°，如图 7-48 所示。

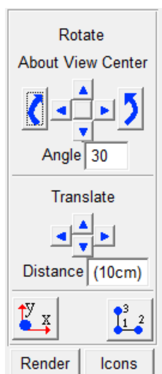


图 7-47 设置参数

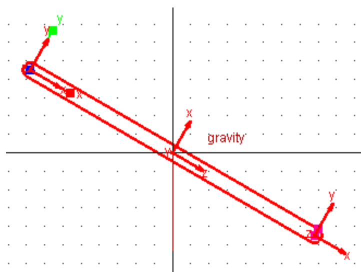


图 7-48 转动摆臂

7.2.5 建立单摆支点

（1）在主工具箱中选择链接副。

（2）系统打开参数设置对话框，如图 7-49 所示，确认在工具箱下方的 Construction 文本框中显示 1 Location 和 Normal To Grid。

（3）鼠标左键单击摆臂的左端点 PART_2 MARKER_1。

（4）在大地和摆臂之间生成一个铰接支点，如图 7-50 所示。

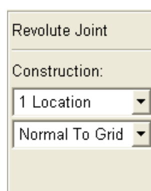


图 7-49 设置参数

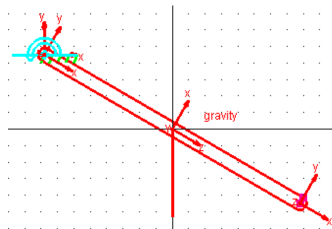


图 7-50 建立铰接支点

7.2.6 设置初始运动

（1）鼠标右键单击摆臂，在打开的右键快捷菜单中选择 Modify 命令，如图 7-51 所

示。

（2）系统打开修改对话框，如图 7-52 所示。在 Category 项选择 Velocity Initial Conditions。

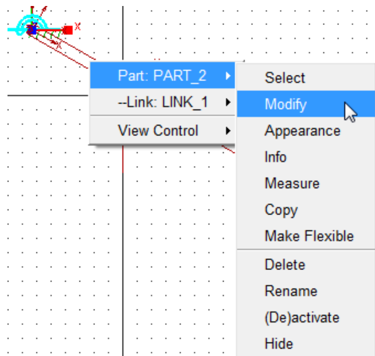


图 7-51　快捷菜单

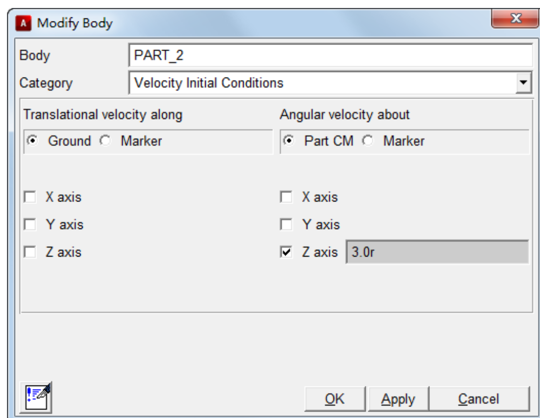


图 7-52　设置初始运动

（3）在 Angular velocity about 项选择 Part CM。

（4）在下面的选项中选择 z 轴，并输入 3.0r。

（5）输入完成后先单击 Apply 按钮，得到图 7-52 所示界面，再单击“OK”按钮。

7.2.7　验证模型

通过验证模型可以发现建模过程中的错误，ADAMS 会自动检测一些错误，如未连接的约束、动力系统中无质量的部件、无约束的部件等，并给出警告可能引发的问题。

（1）在 ADAMS 窗体的右下角，用鼠标右键单击 Information（信息）按钮 i。

（2）在弹出的级联图标中选择 Verification 图标 ✓，弹出信息窗口，如图 7-53 所示。

（3）模型验证无误后，关闭信息窗口。完整的模型如图 7-54 所示。



图 7-53　信息窗口

模型建立完毕，下面建立测量窗口并运行仿真。

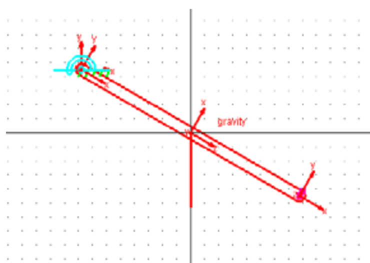


图 7-54　单摆模型

7.2.8　设置 A 点支撑力的测量

（1）鼠标右键单击单摆左端点，选择 Joint：JOINT_1 → Measure，如图 7-55 所示，弹出铰接测量对话框，如图 7-56 所示。

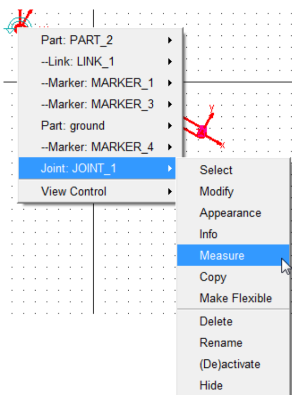


图 7-55　右键快捷菜单

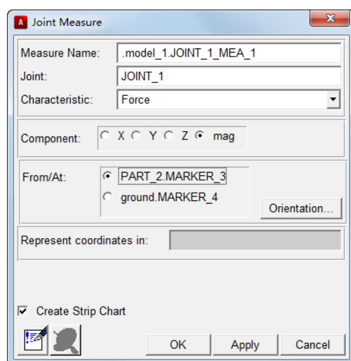


图 7-56　测量对话框

（2）在 Characteristic 栏选择 Force，Component 栏选择 mag（幅值）。

（3）设定完毕单击“OK”按钮。

（4）出现一个空白测量窗口，如图 7-57 所示。

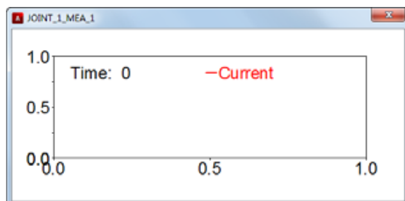


图 7-57　空白测量窗口

7.2.9　运行仿真

（1）单击工具箱中的仿真图标，系统打开参数设置对话框，如图 7-58 所示，将

End Time 设为 0.5，Steps 设为 50。

（2）单击开始按钮，单摆开始摆动，测量窗口出现测量曲线，如图 7-59 所示。

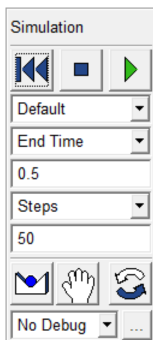


图 7-58 参数设置对话框

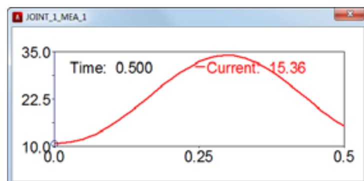


图 7-59 测量曲线

（3）仿真结束，单击返回按钮。

7.2.10 得到支撑力

（1）在测量窗口的空白处点鼠标右键，选择 Plot：scht1 → Transfer To Full Plot，如图 7-60 所示，在 ADAMS / PostProcessor 环境下绘制测量曲线。

（2）选择 Plot Tracking 图标。要求计算时的条件即为开始仿真时的条件，把鼠标置于仿真曲线的开始位置。

（3）窗口顶端，x 为仿真时间，y 为支撑力即要计算的支撑力，结果显示为 10.7784N，如图 7-61 所示。

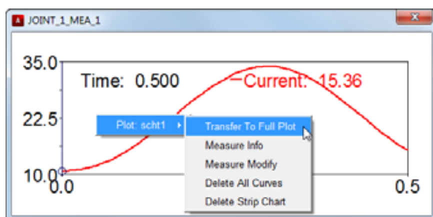


图 7-60 右键快捷菜单

7.3 凸轮机构

本实例主要分为以下几个步骤：

（1）建立实体模型。

（2）建立广义线。

（3）建立链接和接触条件。

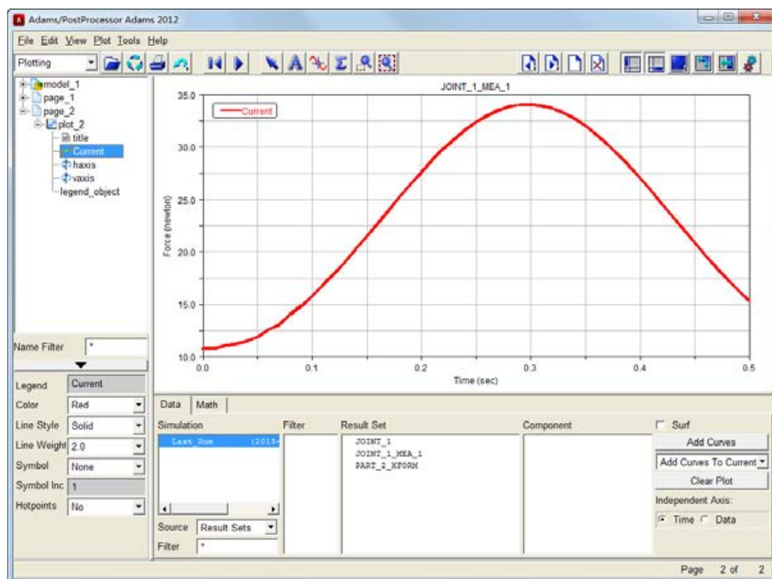


图 7-61 测量曲线

（4）建立和运行仿真。

（5）分析结果。

凸轮机构如图 7-62 所示，模型包括 3 个部件（包括大地），一个转动副，一个平动副，一个运动和几个标记点。

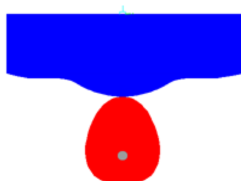


图 7-62 凸轮机构

7.3.1 运行 ADAMS

（1）通过“开始”→“所有程序”运行 Adams-View 2012，或直接双击桌面上的快捷方式 Adams - View 2012，运行 ADAMS 2012。

（2）选择 New Model，打开“Create New Model”对话框。

（3）确认 Gravity（重力）文本框中是 Earth Normal（-Global Y），Units（单位）文本框中是 MMKS-mm，kg，N，s，deg，如图 7-63 所示。确认后单击“OK”按钮。

（4）创建新模型后，在 ADAMS/View 工作窗口的左上角显示有模型的名称。如果 ADAMS/View 中没有默认设置为经典界面，请单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，可以将界面切换为经典界面。

（5）在 Settings 下拉菜单中选择 Working Grid…．，系统打开参数设置对话框，如图 7-64 所示。在 Spacing 栏的 X 和 Y 项都输入 10 mm。

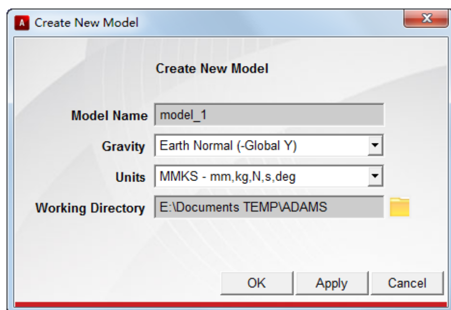


图 7-63　开始界面

（6）单击工具箱中的选择图标。

（7）单击工具箱中的缩放图标，使栅格布满整个屏幕。

7.3.2　建立凸轮部件

（1）单击 F4 弹出坐标框。

（2）用鼠标右键单击工具箱中的连接图标，弹出级联图标。

（3）用鼠标左键单击多义线图标。

（4）系统打开参数设置对话框，如图 7-65 所示，确认在工具箱下方文本框中显示 New Part。选中下面的 Closed 选项，绘制封闭的多义线。

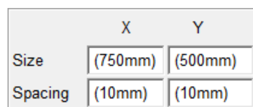


图 7-64　设置参数

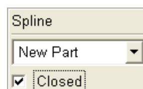


图 7-65　设置参数

（5）按表 7-1 在屏幕上单击 13 个点，注意，最后一点跟第一个点重合。

（6）选择完毕各点后，单击鼠标右键生成该曲线。此时会出现一提示框，如图 7-66 所示，提示该物体没质量。

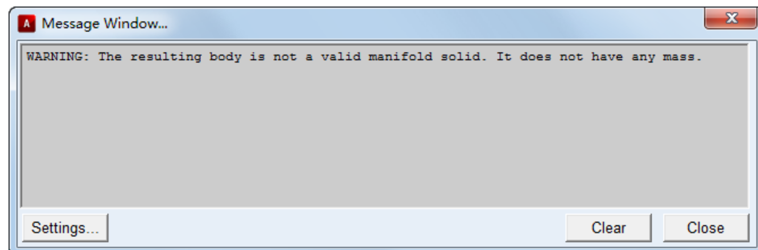


图 7-66　提示框

（7）关闭对话框，封闭曲线如图 7-67 所示。

表 7-1　凸轮曲线点坐标

点	X	Y	Z
1	0	0	0
2	-50	-30	0
3	-70	-70	0
4	-80	-120	0
5	-70	-160	0
6	-50	-180	0
7	0	-190	0
8	50	-180	0
9	70	-160	0
10	80	-120	0
11	70	-70	0
12	50	-30	0
13	0	0	0

7.3.3　建立转动副

（1）在主工具箱中选择链接副。

（2）系统打开参数设置对话框，如图 7-68 所示。确认在工具箱下方的 Constrcution 文本框中显示 1 Location 和 Normal To Grid。

（3）鼠标左键单击（0，-130，0）。

（4）在大地和凸轮之间生成一个铰接支点，如图 7-69 所示。

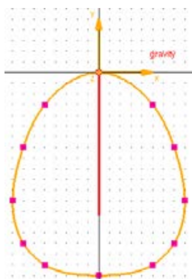


图 7-67　封闭曲线

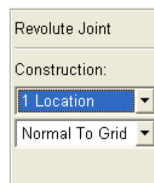


图 7-68　设置参数

7.3.4　建立其他部件

（1）用鼠标左键单击多义线图标。

（2）系统打开参数设置对话框，如图 7-70 所示。在工具箱下方取消下面的 Closed

选项，绘制不封闭的多义线。

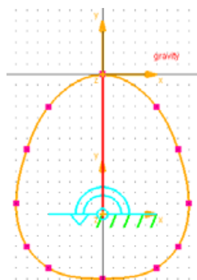


图 7-69　建立铰接副

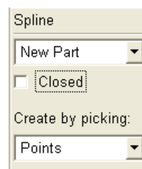


图 7-70　设置参数

（3）按表 7-2 在屏幕上单击 11 个点。

（4）选择完毕上述 11 各点后，单击鼠标右键建立开放的曲线，此时会出现一个提示窗口，如图 7-71 所示，提示该部件没体积，关闭该窗口。该曲线如图 7-72 所示。

（5）在工具箱中选择 Rigid Body：Box 图标。

（6）系统打开参数设置对话框，如图 7-73 所示，在下方的 Box 项中选择 Add to Part。

表 7-2　部件曲线点坐标

点	X	Y	Z
1	-250	50	0
2	-200	40	0
3	-150	40	0
4	-100	30	0
5	-50	10	0
6	0	0	0
7	50	10	0
8	100	30	0
9	150	40	0
10	200	40	0
11	250	50	0

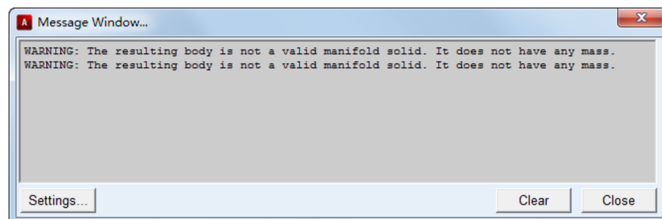


图 7-71　提示框

（7）鼠标单击开放的曲线以添加物体。

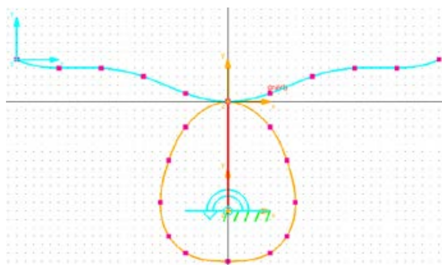


图 7-72　未封闭的曲线

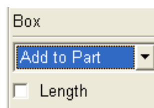


图 7-73　参数设置

（8）定义盒子的顶点（-250，50，0）。

（9）按住鼠标并拖至盒子的右上顶点（250，180，0）释放鼠标。新建实体如图 7-74 所示。

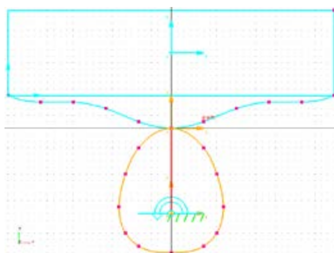


图 7-74　建立实体

7.3.5　建立平动副

（1）用鼠标右键单击工具箱中的铰链图标，弹出级联图标。

（2）用鼠标左键单击平动副图标。

（3）系统打开参数设置对话框，如图 7-75 所示。确认 Construction 设为 1 Location 和 Pick Feature。

（4）鼠标单击平动副的位置（0，160，0）。

（5）沿 y 向向上移动鼠标，设置平动副方向。

（6）完成大地与其他部件间的连接，如图 7-76 所示。

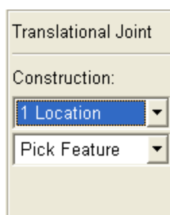


图 7-75　设置参数

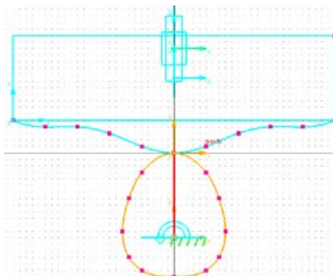


图 7-76　建立平动副

7.3.6 添加线—线约束

（1）用鼠标右键单击工具箱中的铰链图标，在弹出的级联图标中用鼠标左键单击凸轮接触图标。

（2）单击凸轮部件，再单击其他部件曲线部分，建立图 7-77 所丧失的线-线接触。

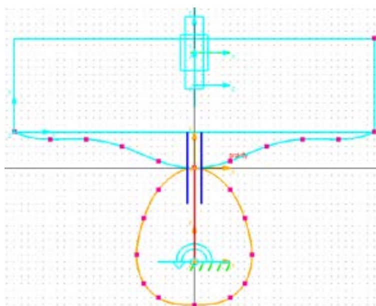


图 7-77 建立线-线接触

7.3.7 添加运动约束

（1）在工具箱中选择旋转铰运动。

（2）系统打开参数设置对话框，如图 7-78 所示。在 Speed 栏输入 360d，即设置每秒 360º。

（3）单击凸轮的旋转副位置，出现一较大的运动方向箭头，如图 7-79 所示。

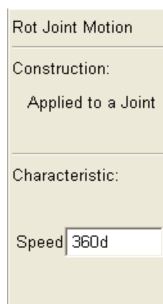


图 7-78 设置参数

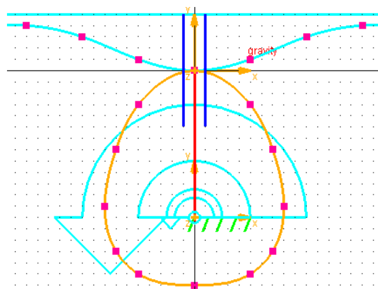


图 7-79 建立旋转运动

7.3.8 验证模型

（1）在 ADAMS 窗体的右下角，用鼠标右键单击 Information（信息）按钮 i。

（2）在弹出的级联图标中选择 Verification 图标 ✓，弹出信息窗口，如图 7-80 所示。

（3）模型验证无误后，关闭信息窗口。

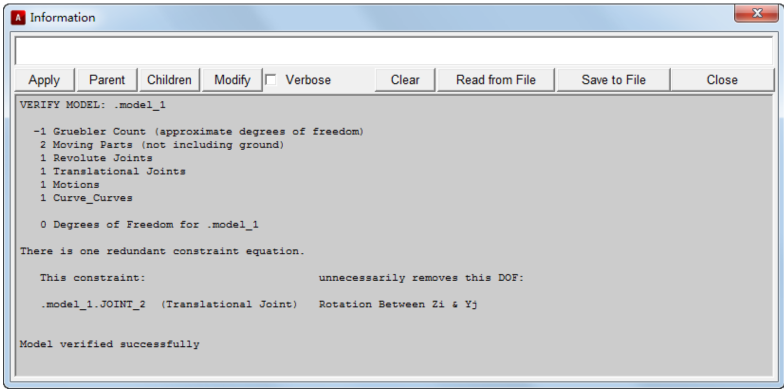


图 7-80　信息窗口

7.3.9　建立测量

（1）鼠标右键单击其他部件，系统打开右键快捷菜单，如图 7-81 所示，选择 Measure。

（2）系统打开参数设置对话框，如图 7-82，将 Characteristic 设为 CM position，Component 设为 Y，测量 y 向位移。

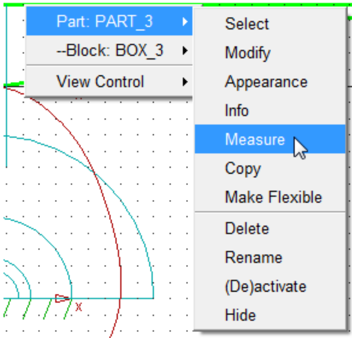


图 7-81　右键快捷菜单

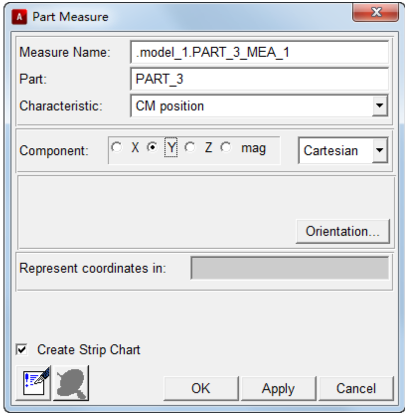


图 7-82　设置参数

（3）单击 Apply，出现空白的测量窗口，如图 7-83 所示。

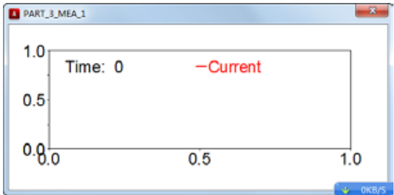


图 7-83　建立的测量窗口

（4）重复上述步骤，将 Characteristic 设为 CM velocity，新建测量速度。

（5）重复上述步骤，将 Characteristic 设为 CM acceleration，新建测量加速度。

（6）建立 3 个测量窗口后，单击 Cancel 按钮关闭测量对话框，窗体如图 7-84 所示。

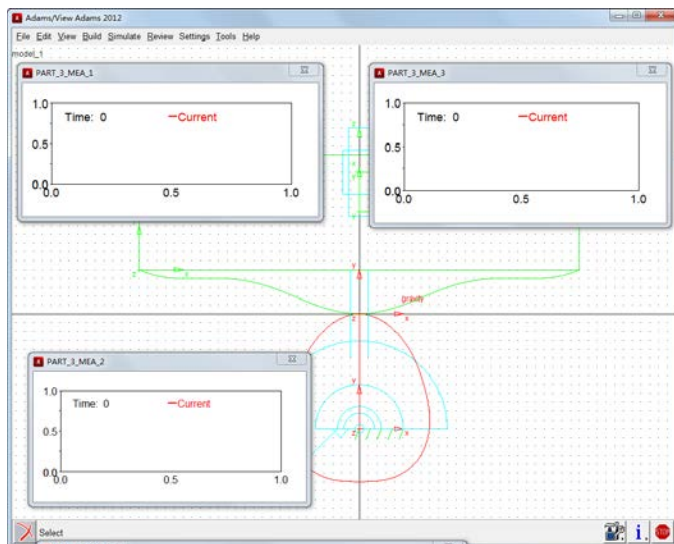


图 7-84　建立的测量窗口

7.3.10　运行仿真

（1）单击工具箱中的仿真图标，系统打开参数设置对话框，如图 7-85 所示，将 End Time 设为 1，Steps 设为 50。

（2）单击开始按钮，凸轮开始转动，其他部件上下运动。

（3）仿真结束，单击返回按钮。仿真结果如图 7-86 所示。

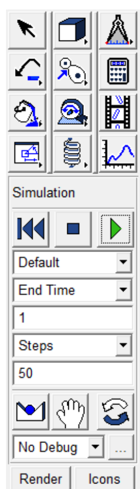


图 7-85　设置参数

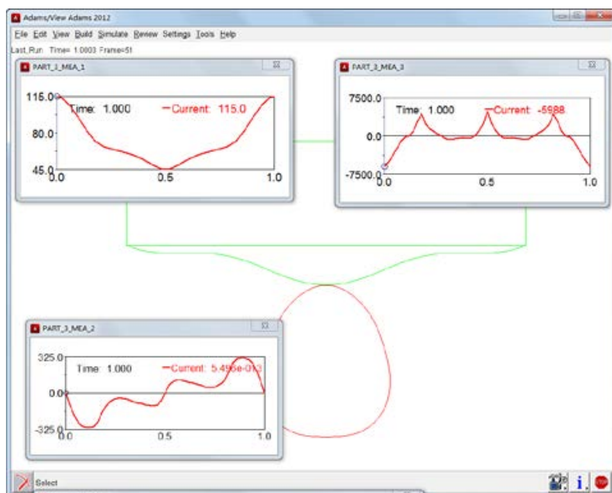


图 7-86　仿真结果

（4）在每个测量窗口的空白处按鼠标右键，系统打开右键快捷菜单，选择 Transfer To Full Plot 命令，如图 7-87 所示。在 ADAMS / PostProcessor 环境下绘制测量曲线。



提示

如果仿真时出错，可以把 Simulation 下的 Default 改为 Dynamic.

（5）选择 Plot Tracking 图标，可以显示仿真曲线上任一点的精确数值。

（6）单击返回建模按钮可以返回到建模窗口。

（7）在 File 下拉菜单下选择 Save Database As...，出现保存对话框，如图 7-88 所示。

（8）在 File Name 栏输入文件名字，如 cam。

（9）单击“OK”按钮，生成 ADAMS 二进制文件。

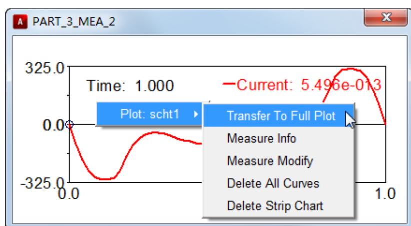


图 7-87　右键快捷菜单

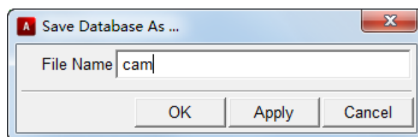


图 7-88　保存对话框

7.4 自由降落的石块

本节通过对一自由降落的石块进行仿真分析，进一步了解 ADAMS 中坐标系统、标记点、几何实体、测量等概念。

自由降落的石块如图 7-89 所示，试通过 ADAMS 进行仿真，计算在初始速度为 0 的情况下，1s 后石块的位移、速度和加速度。



图 7-89　自由降落的石块

7.4.1　启动 ADAMS

（1）通过“开始”→“所有程序”运行 Adams-View 2012，或直接双击桌面上的快

捷方式 Adams - View 2012，运行 ADAMS 2012。

（2）在如图 7-90 所示的欢迎界面中，选择 New Model，打开“Create New Model”对话框。

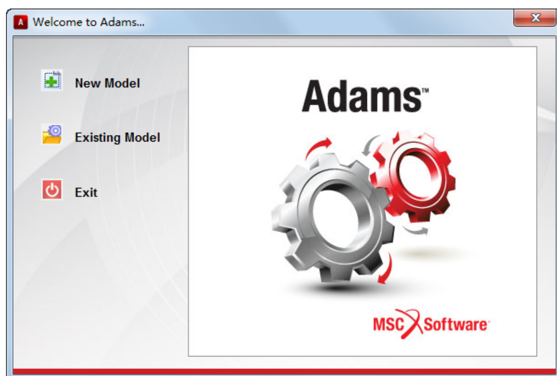


图 7-90　开始界面

（3）确认 Gravity（重力）文本框中是 Earth Normal（-Global Y），Units（单位）文本框中是 MMKS-mm，kg，N，s，deg，单击“OK”按钮。

（4）创建新模型后，在 ADAMS/View 工作窗口的左上角显示有模型的名称。如果 ADAMS/View 中没有默认设置为经典界面，请单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，可以将界面切换为经典界面。

7.4.2　建立模型

（1）单击 F4 键，或者选择 View 菜单选择 Coordinate Windows 命令，打开坐标窗口，以便查看模型的尺寸。

（2）在主工具箱右键单击 Rigid Body，在弹出的级联图标中选择 Sphere 工具，如图 7-91 所示。

（3）系统打开参数设置对话框，如图 7-92 所示，在主工具箱下方设置球体的参数，半径设为 5cm。

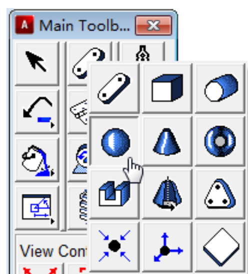


图 7-91　选择 Sphere 工具

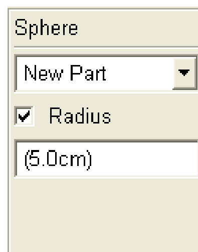


图 7-92　设置球体

（4）在屏幕中心，即全局坐标系中心点鼠标左键建立球体。

（5）如果显示的球体太小，接下来调整视图大小。

（6）单击工具箱中的选择按钮。

（7）在工具箱中部选择缩放按钮。

（8）按住鼠标左键在屏幕上拖动，调整视图的大小，如图 7-93 所示。

（9）给球体命名。在球体上单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择 Part_2 → Rename，如图 7-94 所示。

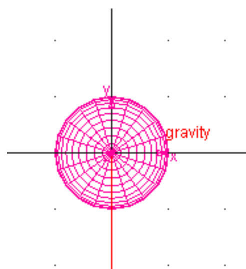


图 7-93　球体

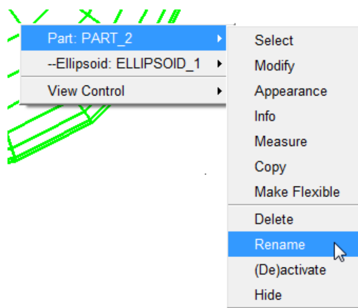


图 7-94　给球体命名

（10）系统打开命名对话框，输入 Stone，如图 7-95 所示。

（11）输入完毕，单击“OK”按钮。

（12）设置球体的质量。在球体上单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择 Stone → Modify，如图 7-96 所示。

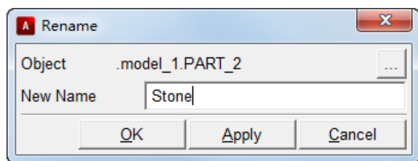


图 7-95　输入球体名字

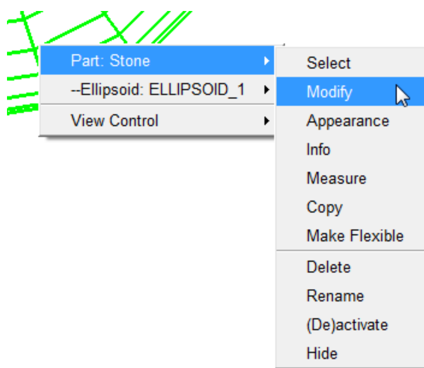


图 7-96　设置球体属性

（13）在属性对话框中修改球体的属性，Define Mass By 为 User Input ，Mass 为 1.0 kg，如图 7-97 所示。

（14）输入完毕，单击“OK”按钮。

7.4.3　建立测量

（1）在球体上单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择 Part stone → Measure，如图

7-98。

（2）在弹出的测量对话框中设置：Measure Name 为 displace，即建立 y 向的位移测量；Characteristic 为 CM position，即测量中心点的位移；Component 为 Y，即位移方向为 y 向；选中 Create Strip Chart，如图 7-99 所示。

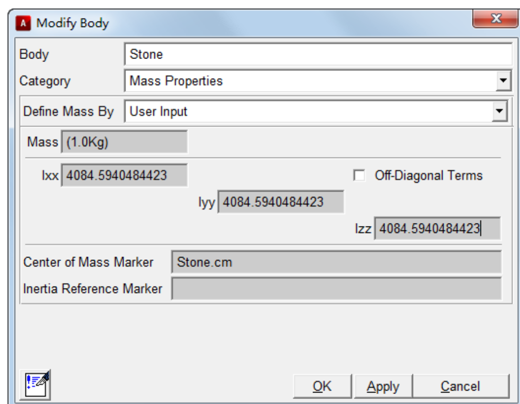


图 7-97　修改属性对话框

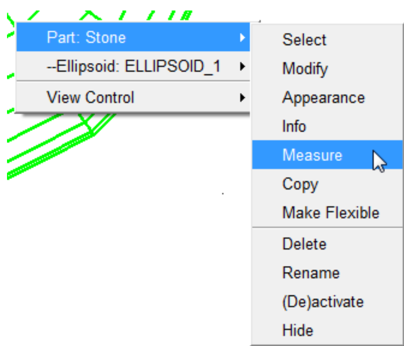


图 7-98　建立测量

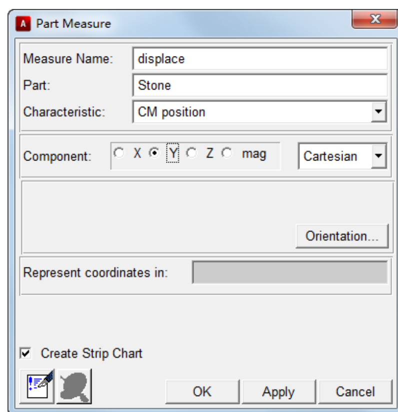


图 7-99　建立位移测量

（3）设置完毕，单击“OK”按钮。

（4）此时在屏幕上弹出一空白的测量窗口，如图 7-100 所示，因为还没有进行仿真计算，所以没有任何输出。

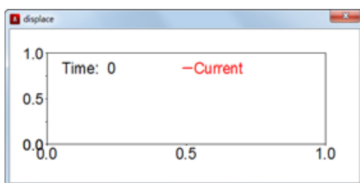


图 7-100　测量窗口

（5）建立位移测量后，根据计算要求还需要对速度建立测量。

（6）重复步骤（1）。

（7）在弹出的测量对话框中设置速度测量：Measure Name 设为 velocity，即建立 y 向的速度测量；Characteristic 设为 CM velocity，即测量中心点的速度；Component 设为 Y，即速度方向为 y 向；选中 Create Strip Chart，如图 7-101 所示。

（8）设置完毕单击“OK”按钮。此时在屏幕上弹出一空白的测量窗口，因为还没有进行仿真计算，所以没有任何输出。

（9）重复上述步骤建立加速度的测量，Measure Name 设为 acceloration，即建立 y 向的加速度测量，如图 7-102 所示。

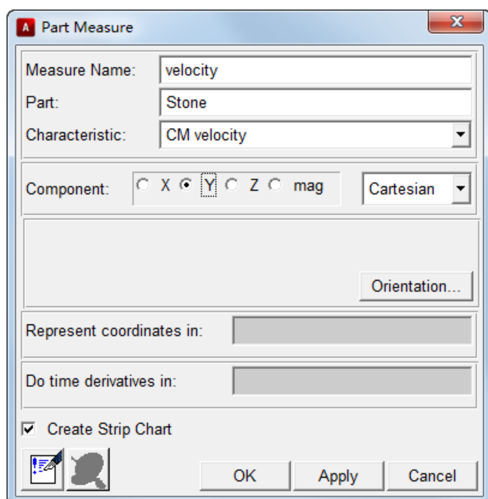


图 7-101　建立速度测量

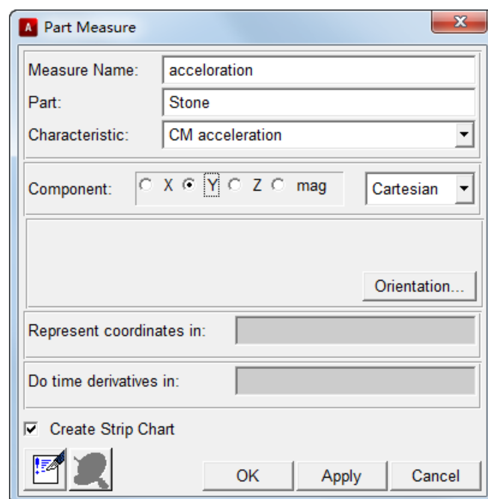


图 7-102　建立加速度测量

7.4.4　验证模型

模型建立以后，需要验证模型，确定模型中是否存在一些错误条件，如不匹配的连接、无约束的部件、动力系统中无质量部件等。

（1）右键单击状态栏右侧的信息按钮 i，在弹出的级联按钮中选择验证按钮 ✓。

（2）在弹出的信息窗口中，显示模型的相关信息，如刚体个数、约束个数、自由度以及是否有错等，如图 7-103 所示。

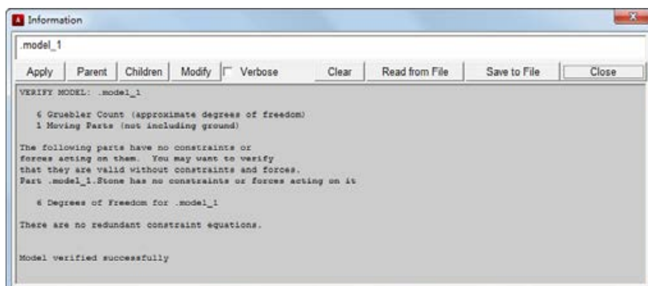


图 7-103　信息窗口

（3）经验证无误后，关闭信息窗口。

7.4.5　运行仿真

（1）在主工具箱中选择仿真工具。

（2）在主工具箱中下方设置仿真参数：End Time 为 1.0s，Steps 为 50。

（3）单击 Play 按钮。石块开始自由降落，同时在位移、速度、加速度测量的窗口出现测量数据曲线，如图 7-104～图 7-106 所示。

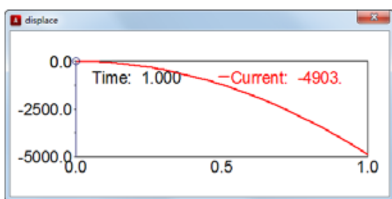


图 7-104　位移测量曲线

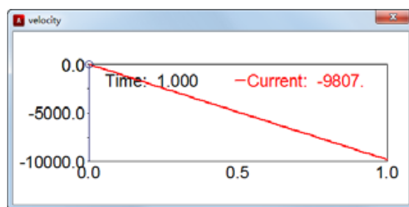


图 7-105　速度测量曲线

（4）仿真结束后，单击返回按钮回至初始状态。

（5）若要查看刚才的仿真动画，单击工具箱底部的回放按钮。

（6）根据仿真测量曲线查看位移、速度和加速度。首先在位移测量窗口的空白处单击鼠标右键，在右键快捷菜单中选择 Plot：scht1 → Transfer To Full Plot，如图 7-107 所示。

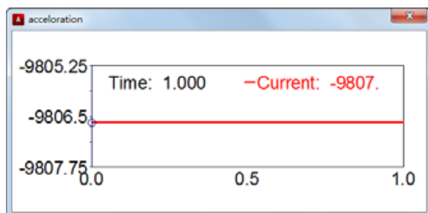


图 7-106　加速度测量曲线

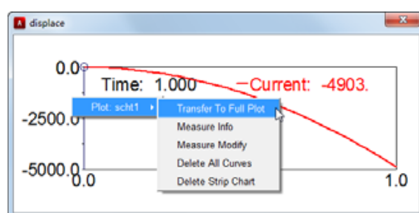


图 7-107　改变显示窗口

（7）ADAMS 切换至 PostProcessor 后处理模块窗口，位移测量曲线在更大的窗口中显示，如图 7-108 所示，如果单击工具栏中 view 按钮，可以切换至 Adams/View 窗口。

（8）在 ADAMS/PostProcessor 窗口中，选择 plot tracking 按钮，在工具栏下侧出现一排数字标签，显示当前点的坐标值和运算的结果，如图 7-109 所示。

（9）根据要求石块自由降落 1s 后的位移，把鼠标移动至曲线坐标在 x=1.0 处，此时在数字标签部分，Y 的显示值为-4093.3299，即通过 ADAMS 仿真运算得到的结果。

（10）在 PostProcessor 窗口的右下侧选中 Surf，以后添加曲线就无须再单击 Add Curves 按钮了，如图 7-110。Source 设为 Measures，如图 7-111 所示。

（11）从 Measures 列表中选择 velocity，如图 7-112。

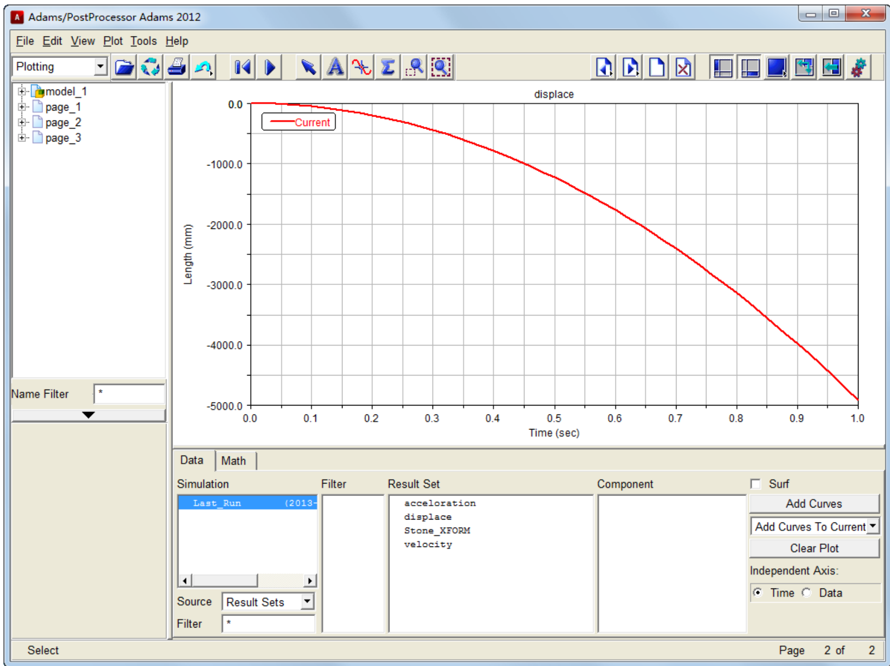


图 7-108　Adams 后处理窗口

X:	Y:	Slope:	Min:	Max:	Avg:	RMS:	# of Points:
1.0	-4903.3299	-9708.5835	-4903.3299	0.0	-1650.7909	2225.5573	51

图 7-109　数字标签

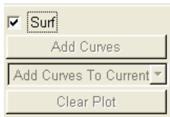


图 7-110　设置参数

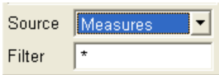


图 7-111　设置参数

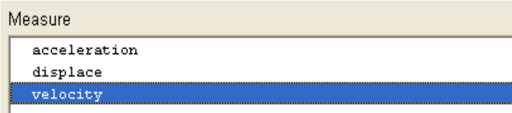


图 7-112　选择参数

（12）窗口中显示 velocity 测量曲线，如图 7-113 所示。

（13）将鼠标移动至横坐标为 1.0 处，在数字标签处显示的数值 y 为-9807.65，单位为 mm/s，即为仿真计算得到的速度值。

（14）选择 Measures 列表中的 acceleration，显示加速度测量曲线，如图 7-114 所示。

（15）将鼠标移动至横坐标为 1.0 处，在数字标签处显示的数值y为-9807.65，单位为mm/s^2，即为仿真计算得到的加速度值。

（16）根据ADAMS的仿真结果，得到自由降落的石块 1s后的位移、速度和加速度分别为：位移displace=-4903.3mm；速度velocity=-9807.7mm/s加速度acceleration=

-9807.7mm/s²。

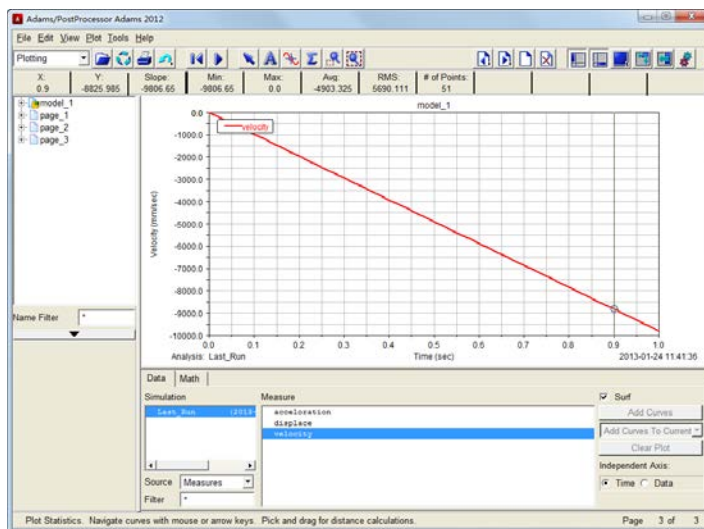


图 7-113　显示速度测量曲线

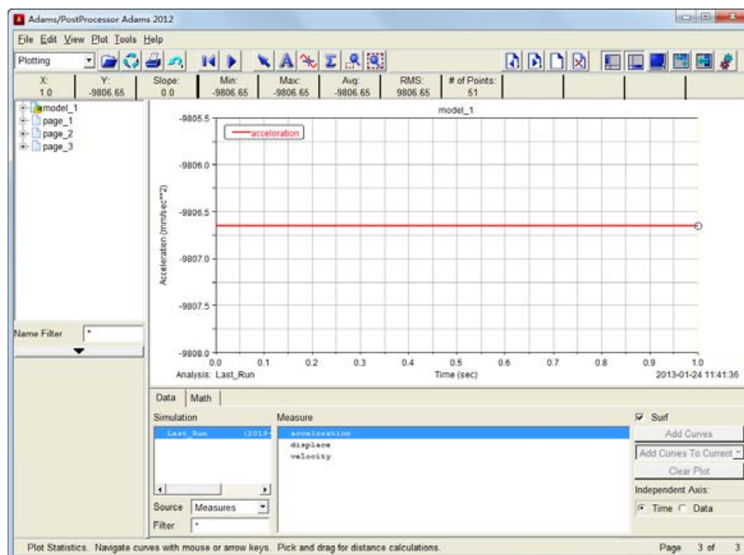


图 7-114　加速度测量曲线

（17）由于下一节的实例中将用到石块模型，所以保存文件，名称为 stone。

7.5 投射石块

本例的初始条件为以初速度 6m/s、倾斜角度 60° 投射一石块，如图 7-115 所示，要求对投射的水平距离 R 进行仿真求解。

7.5.1　启动 ADAMS

通过“开始”→“所有程序”运行 Adams-View 2012，或直接双击桌面上的快捷方式 Adams－View 2012，运行 ADAMS 2012，如图 7-116 所示。在欢迎界面中，选择 Existing Model，打开上节已保存的文件 stone。

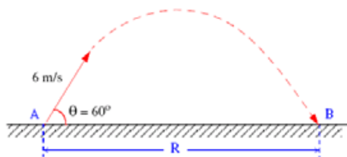


图 7-115　投射石块

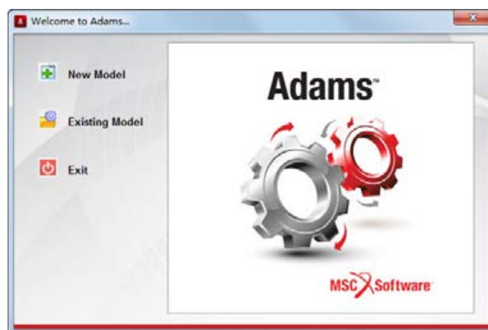


图 7-116　开始界面

7.5.2　建立模型

本例继续使用上一节的石块模型，在石块下面新建立一个地基。

（1）选择 View 主菜单中的 Settings 菜单，选择 Working Grid 命令。

（2）系统打开参数设置对话框，修改 Size X 为 4000，修改 Size Y 为 3000，在 Spacing 栏各设为 50mm，各项设置如图 7-117 所示。设置完毕单击“OK”按钮。

（3）选择工具箱中的缩放按钮，使工作栅格布满整个屏幕。

（4）单击 F4 键，或在 View 菜单中选择 Coordinate Windows。

（5）在主工具箱中，用鼠标右键单击实体按钮，选择 Box 工具，如图 7-118 所示。

（6）系统打开参数设置对话框，在工具箱下方的设置栏中设置参数：

- 选择 On Ground。
- 选中 Length，在 Length 栏输入 350.0cm。
- 选中 Height 和 Width，均输入 10.0cm。如图 7-119 所示。

（7）单击地基的顶点（0，-150，0），石块与地基的位置如图 7-120 所示。

（8）根据要求，以 6m/s、60° 倾斜角投射，可以计算出石块的水平方向速度分量和垂直方向速度分量：

$$V_x = 6000 \times \cos(60^\circ) = 3000mm/s$$

$$V_y = 6000 \times \sin(60^\circ) = 5196mm/s$$

（9）设置石块的初始条件。单击主工具箱中的选择按钮。

（10）用鼠标右键单击石块，在弹出的菜单中选择 Modify，如图 7-121 所示。

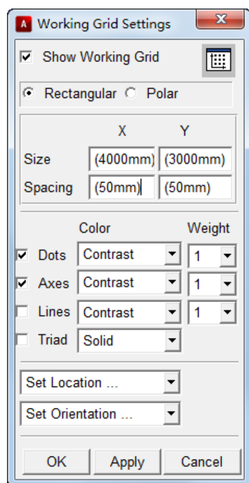


图 7-117　设置工作栅格

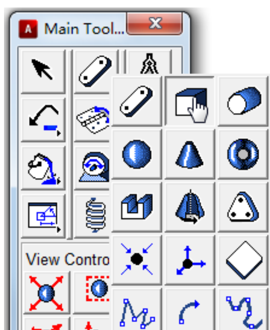


图 7-118　工具箱

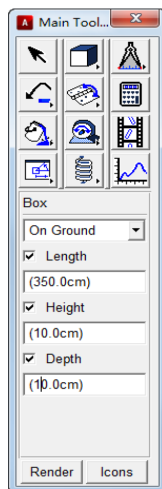


图 7-119　Box 参数设置

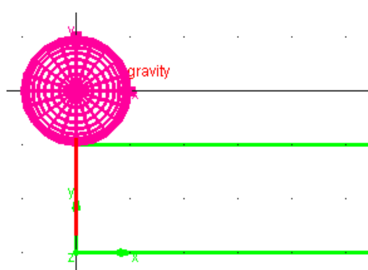


图 7-120　建立地基

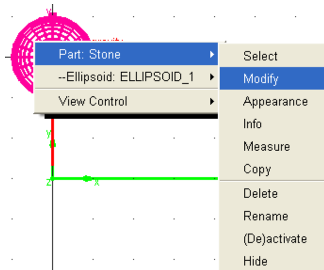


图 7-121　修改石块初始条件

（11）系统打开修改对话框，在修改对话框中设置：Category：Velocity Initial Conditions。

在 Translational velocity along 下选择 X axis，并输入（6*cos（60d）（m/sec））或者（3000（mm/sec））。

在 Translational velocity along 下选择 Y axis，并输入（6*sin（60d）（m/sec））或者（(5196mm/sec)），如图 7-122 所示。

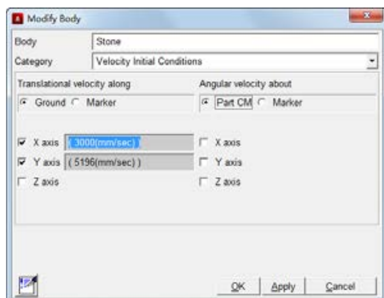


图7-122　设置初始速度

（12）设置完毕，单击“OK”按钮。

7.5.3 建立测量

（1）右键单击石块，在弹出的菜单中选择 Measure，如图 7-123 所示。

（2）在测量对话框中，如图 7-124 所示建立测量：

- Measure name：R_displacement
- Characteristic：CM position
- Component ：X
- 选中 Create Strip Chart。

设置完毕，单击“OK”按钮。

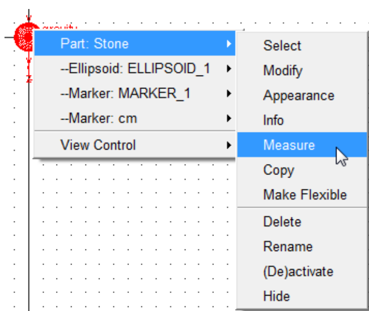


图7-123　建立测量

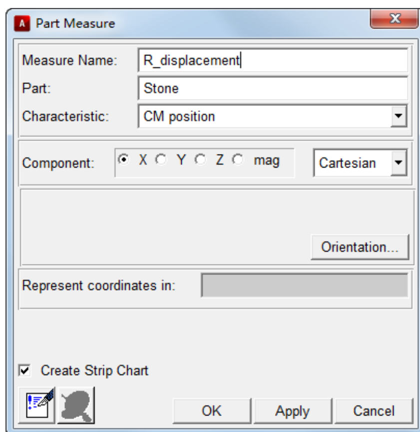


图7-124　测量对话框

（3）由于还没有进行仿真运算，系统弹出一个空白测量窗口。

7.5.4 进行仿真

（2）　在工具箱中选择 Simulation 按钮。

（2）系统打开参数设置对话框，如图 7-125 所示，设置仿真参数 End time：1.5；Step size：0.02。

（3）设置完毕，单击开始按钮。

（4）ADAMS 仿真开始，测量窗口中开始出现测量曲线，如图 7-126 所示。

（5）仿真完毕，单击返回按钮返回至初始状态。

（6）下面查找石块落地时的距离。在工具箱中选择 Animation 动画按钮. 。

（7）在打开的对话框中单击播放按钮。当石块接触到地面时单击停止按钮。

（8）利用后退一步和前进一步按钮获得精确的落地时刻，如图 7-127 所示。

注意测量窗口中此时的 Time=1.06，如图 7-128 所示。

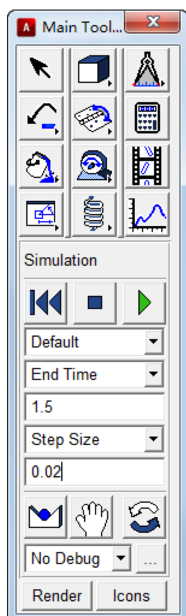


图 7-125　设置仿真参数

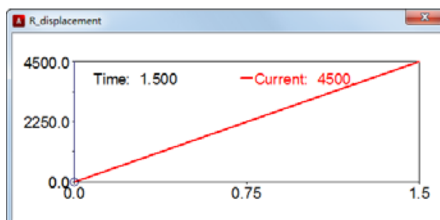


图 7-126　位移测量曲线

图 7-127　石块接触地面

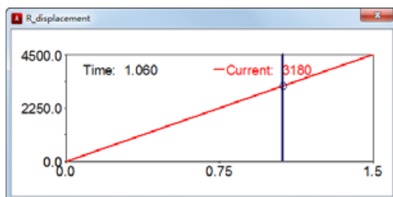


图 7-128　石块落地时刻

（9）单击返回按钮⏮返回初始状态。

（10）在 Review 菜单选择 Animation Controls，弹出动画控制对话框，如图 7-129 所示。选中 Icons，设置 No Trace 为 Trace Marker。

（11）在下侧的空白文本框中单击鼠标右键，选择 Marker → Browse，如图 7-130 所示。

（12）系统打开数据浏览器，选择 Stone.cm，如图 7-131 所示。选择完毕单击“OK”按钮。

（13）标记点名字自动添加到动画对话框中，单击对话框中动画播放按钮▶，在屏幕上绘制出该标记点的运动轨迹。完成后关闭动画控制对话框。

（14）在 R-displacement 测量窗口中单击鼠标右键，选择 Plot: scht1 → Transfer

to Full Plot。View 窗口切换至 ADAMS/PostProcessor 窗口。

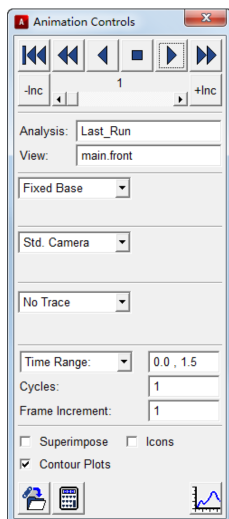


图 7-129 动画控制对话框

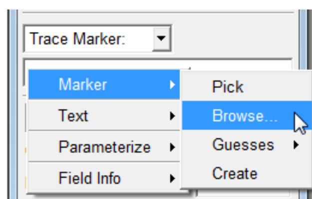


图 7-130 选择标记点

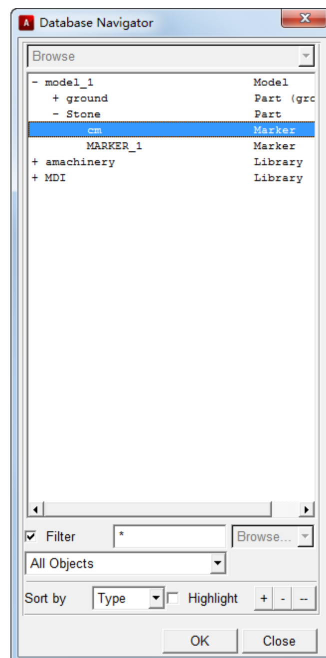


图 7-131 选择跟踪点

（15）在 PostProcessor 窗口工具栏选择 Plot Tracking 按钮，出现数字标签栏。

（16）把鼠标移动到石块落地的时刻，即 time=1.06s，查看 Y 的值为 3180mm，即本例的仿真结果，如图 7-132 所示。

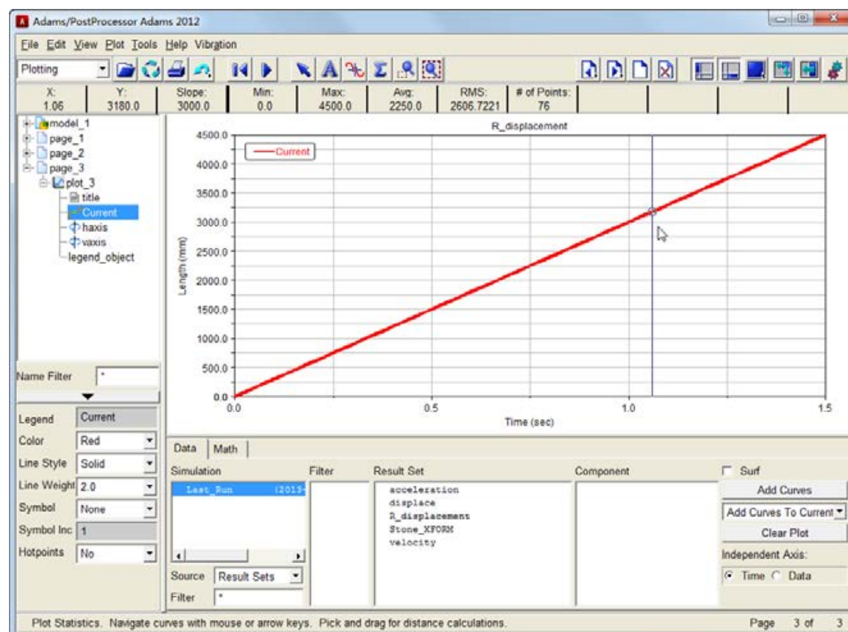


图 7-132 仿真结果

7.6 斜面上的滑块

本例为图 7-133 所示的斜面，要求计算滑块能滑下来的最小倾斜度。

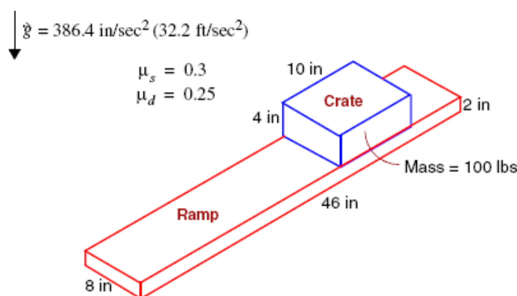


图 7-133　斜面问题

7.6.1　启动 ADAMS

（1）运行 ADAMS 2012，在欢迎界面中，选择 New Model，打开“Create New Model”对话框。

（2）确认 Gravity（重力）文本框中是 Earth Normal（-Global Y），Units（单位）文本框中是 IPS－inch，lbm，lbf，s，deg，如图 7-134 所示。确认后单击“OK”按钮。

（3）创建新模型后，在 ADAMS/View 工作窗口的左上角显示有模型的名称。如果 ADAMS/View 中没有默认设置为经典界面，请单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，可以将界面切换为经典界面。

（4）在 Settings 菜单选择 Working Grid。，如图 7-135 所示。

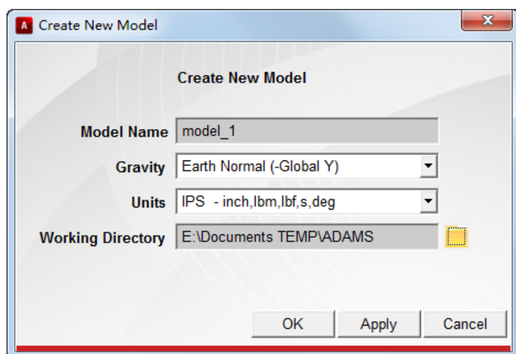


图7-134　设置界面

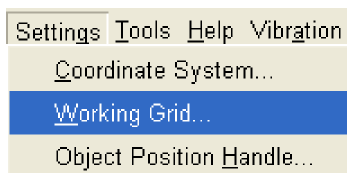


图7-135　Settings菜单

（5）系统打开参数设置对话框，如图 7-136 所示。设置 Spacing 在 x-y 方向均为 1。

（6）查看窗口左下角的坐标系标记，确认是 XY 平面。可以通过调整工具箱中视角控制按钮来选择视角，如图 7-137 所示。

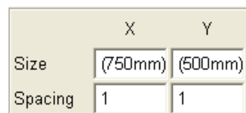
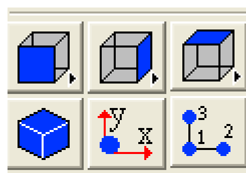


图 7-136 设置参数


图 7-137 视角按钮

（7）建模之前单击 F4 键打开坐标窗口。

7.6.2 建立模型

（1）在工具箱中右键选择 Box 工具按钮，如图 7-138 所示。

（2）在工具箱下侧的参数设置区，设置实体参数：On Ground、Length：46 in、Height：2 in、Depth：8 in、

如图 7-139 所示。

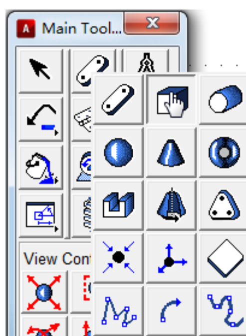


图 7-138 选择 Box 按钮

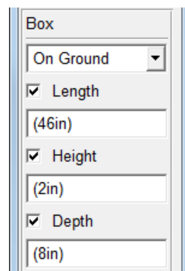


图 7-139 实体参数

（3）设置完毕，在屏幕上单击坐标（-23，0，0），建立一固定在地面上的长方体，作为本题中的斜面，如图 7-140 所示。

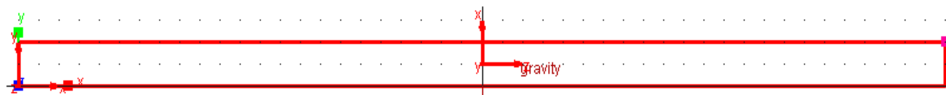


图7-140 建立斜面

（4）用 Box 工具建立滑块。如图 7-141 所示设置实体参数：New Part、Length：10 in、Height：4 in、Depth：8 in。

（5）设置完毕。单击坐标（6，2，0），在斜面上方建立滑块，如图 7-142 所示。

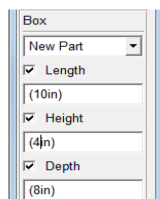


图7-141 实体参数

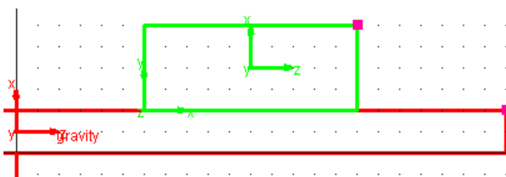


图7-142 建立滑快

（6）右键单击斜面，在弹出的菜单中选择 Block：box_1 → Rename，如图 7-143 所示。在打开的重命名对话框中输入 Ramp。

（7）右键单击滑块，在弹出的菜单中选择 Part：part3→ Rename，在重命名对话框中输入 crate，如图 7-144 所示。

（8）右键单击滑块 crate，在弹出的菜单中选择 Part：crate → Modify，如图 7-145 所示。

（9）在打开的修改属性对话框中设置：Define Mass by：User Input、Mass：100 lbm，如图 7-146 所示，lbm 为英制质量单位，即磅质量。

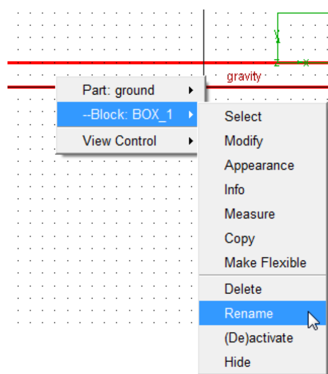


图 7-143　斜面重命名

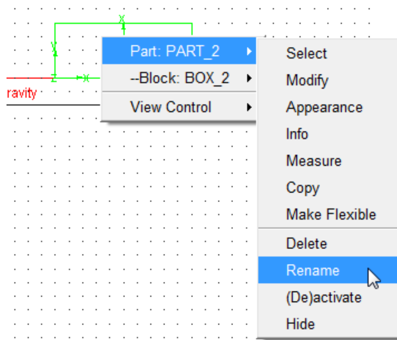


图 7-144　滑块重命名

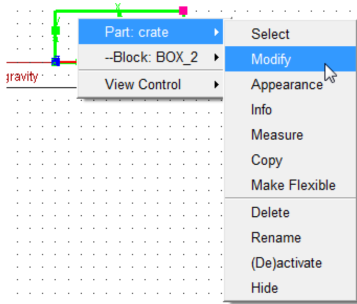


图 7-145　修改滑块属性

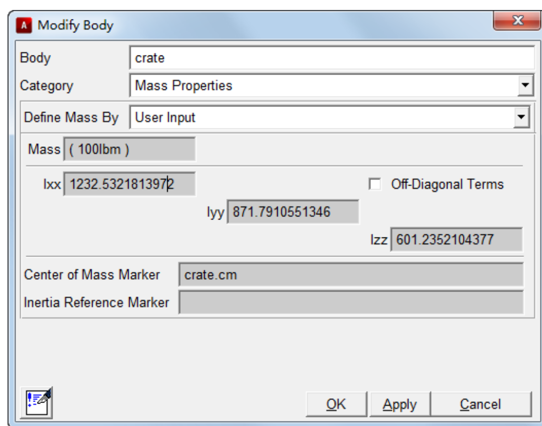


图 7-146　修改滑块质量

（10）设置完毕，单击“OK”按钮。由于斜面固定在地面上，不能直接旋转斜面。这里通过改变斜面角标记点方位实现。

（11）右键单击斜面的角标记点（即建立斜面时鼠标单击的位置），在弹出的菜单中选择 Merker.MRKER_1→ Modify，如图 7-147 所示。

（12）在打开的修改对话框中，Orientation 一栏中由（0，0，0）改为（15，0.0，0.0），如图 7-148 所示。

（13）设置完毕单击“OK”按钮，此时斜面倾斜 15º，如图 7-149 所示。

（14）为了后面选择的方便，先转动一下视角。选择工具箱中的视角旋转按钮，在主窗口中拖动鼠标，看清楚 3 个坐标轴，如图 7-150 所示。

接下来需要旋转滑块，以保证滑块在斜面上。

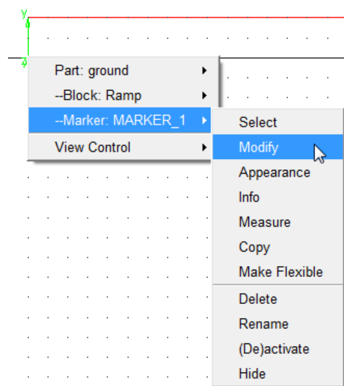


图7-147　快捷菜单

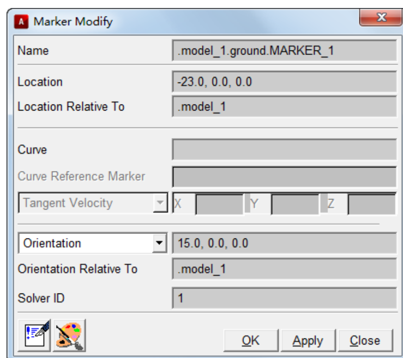


图7-148　修改角标记点的方位

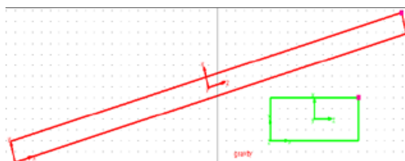


图7-149　斜面倾斜

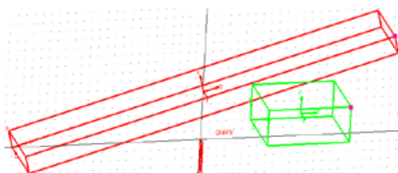
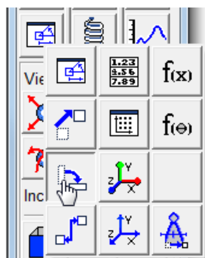


图7-150　旋转视角

（15）右键选择主工具箱中的 Position 按钮，在弹出的级联按钮中选择旋转按钮，如图 7-151 所示。

（16）在工具箱下面的参数设置栏中的 Angle 栏输入 15.0，如图 7-152 所示。



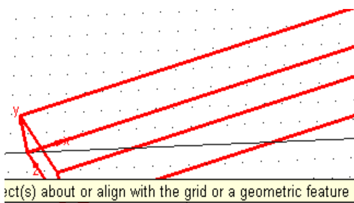


图7-151　选择旋转按钮

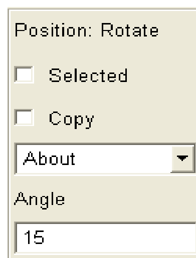


图7-152　设置参数

（17）输入完毕，选择滑块 Crate 作为旋转对象。

（18）选择垂直于 x-y 平面的轴，即 z 轴，作为旋转轴。单击斜面的角标记点，并使方向箭头与该点处的 Z 轴方向重合，完成滑块的旋转，如图 7-153 所示。

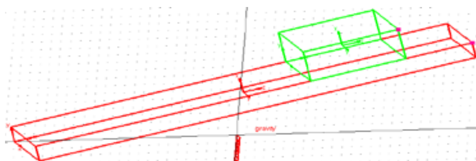


图7-153　旋转滑块

（19）旋转完毕，单击工具箱中的视角按钮，回到正视图状态，如图 7-154 所示。

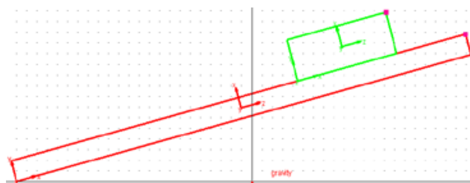


图7-154　正视图状态

7.6.3　添加约束

（1）右键单击工具箱中的连接按钮，在级联按钮中选择平动副按钮，如图 7-155 所示。

（2）在平动副的参数设置中，选择 1 Location，如图 7-156 所示。

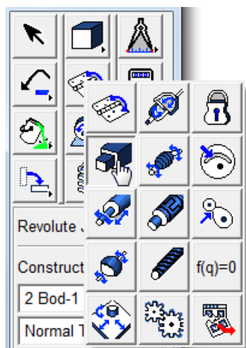


图7-155　添加约束

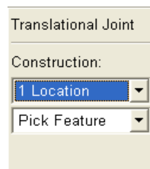


图7-156　设置平动副

（3）单击滑块的左下角标记点作为约束的位置，方向沿斜面方向。

（4）建立后的平动副如图 7-157 所示。

7.6.4　建立测量

（1）右键单击滑块，在弹出的菜单中选择 Part.crate → Measure，如图 7-158 所

示。

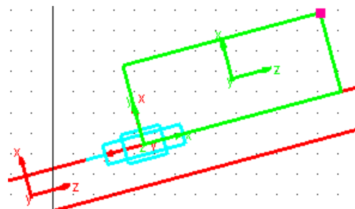


图7-157　建立的平动副

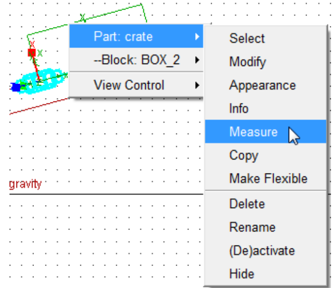


图7-158　建立测量

（2）在打开的测量对话框中，设置测量参数：

- Characteristic：CM acceleration
- Component：X
- Represent coordinates in：MARKER_2（滑块左下角标记点），如图 7-159 所示。

（3）建立完毕出现一空白测量窗口，如图 7-160 所示。

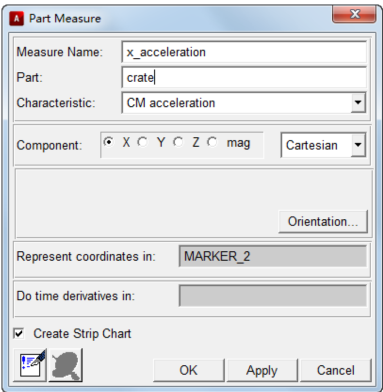


图7-159　测量对话框

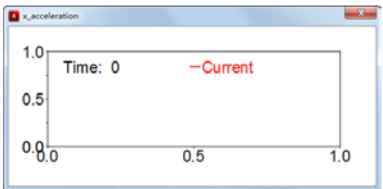


图7-160　测量窗口

7.6.5　验证模型

（1）右键单击状态栏右侧的信息按钮 i，在弹出的级联按钮中选择验证按钮 ✓。

（2）在弹出的信息窗口中，显示模型的相关信息，如刚体个数、约束个数、自由度以及是否有错等，如图 7-161 所示。

（3）经验证无误后，关闭信息窗口。

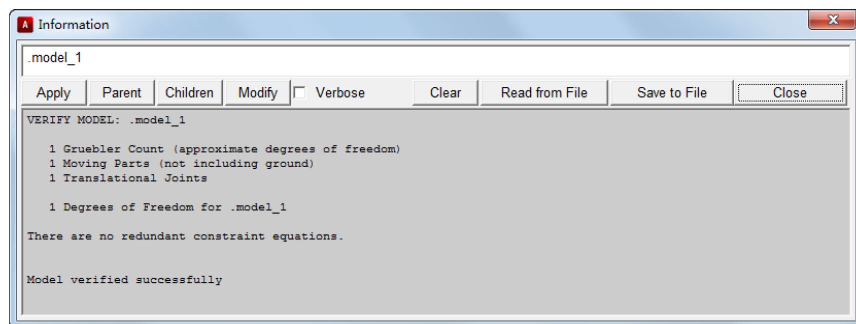


图 7-161　信息窗口

7.6.6　运行仿真

（1）在工具箱中选择 Simulation 按钮。

（2）如图 7-162 所示在工具箱下面的参数区设置仿真参数 End Time：1、Steps：50。

（3）设置完毕单击开始按钮。

（4）ADAMS 仿真开始，测量窗口中开始出现测量曲线，如图 7-163 所示。

（5）仿真完毕单击返回按钮返回至初始状态。



图7-162　仿真参数

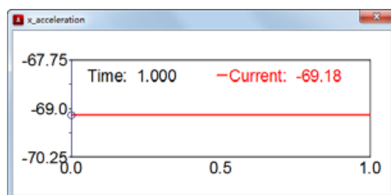


图7-163　测量曲线

7.6.7　改进模型

下面给滑块和斜面间添加摩擦。

（1）右键单击平动副，在弹出的快捷菜单中选择 Joint：JOINT_1→Modify，如图 7-164 所示。

（2）系统打开修改对话框，如图 7-165 所示，选择右下方的摩擦按钮。

（3）在打开的摩擦参数对话框中，Mu Static 设为 0.3，Mu Dynamic 设为 0.25，其他参数不变。

（4）在 Input Forces to Friction 选项中，只选择 Reaction Forces。摩擦参数

设置如图 7-166 所示。

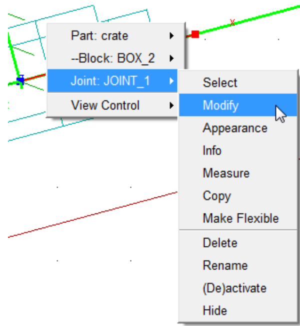


图7-164 修改平动副

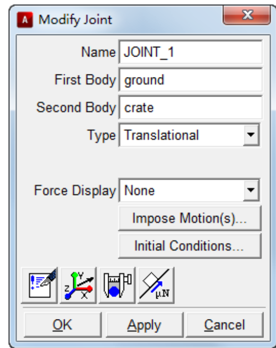


图7-165 平动副修改对话框

（5）重新对模型进行仿真计算，此时滑块在斜面上的位移几乎为零。

为了让滑块滑下，需要进一步加大斜面的倾斜角度。为了让所有部件包括滑块、斜面以及平动副等都一起旋转，需要建立一个组。

（6）在 ADAMS/View 菜单栏中，选择 Build 菜单→ Group → New…，如图 7-167 所示。

（7）在打开的组对话框中，建立组 Group name：rotated_objects，在 Objects in Group 栏单击鼠标右键，选择 All → Browses，在数据浏览窗口中选择模型中除 Part（ground）以外的部件，如图 7-168 所示。

（8）选择完毕单击“OK”按钮，选中的部件自动记录到组对话框中。

（9）在主工具箱中右键单击移动工具按钮，在级联按钮中选择精确定位按钮，如图 7-169 所示。

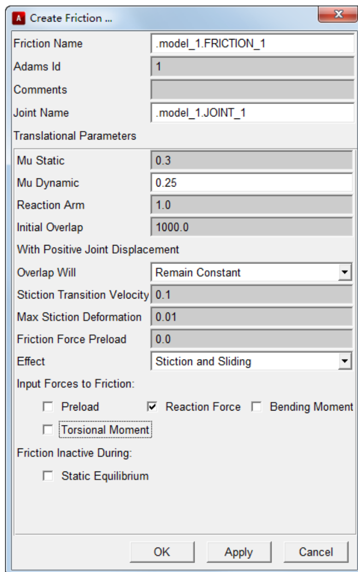


图7-166 摩擦参数对话框

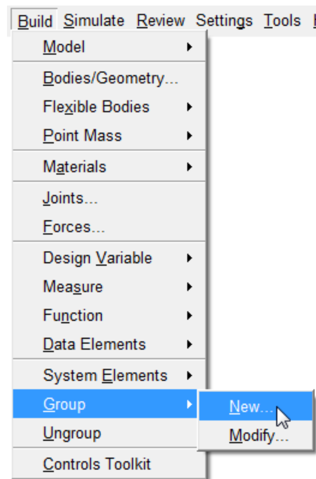


图7-167 建立组

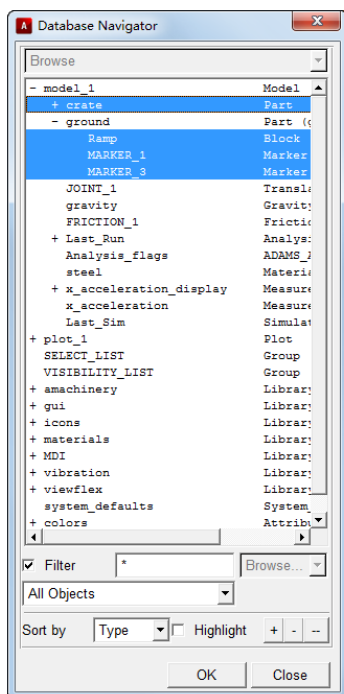


图7-168　选择组中的部件

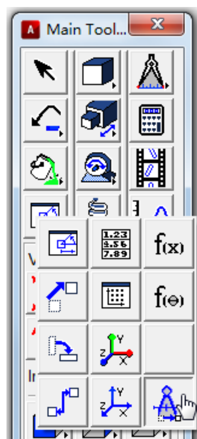


图7-169　选择精确定位工具

（10）在打开的精确定位对话框中，设置 Relocate the 栏为 group，在后面的文本栏中单击鼠标右键，选择 Group → Guesses → rotated_objects，如图 7-170 所示。

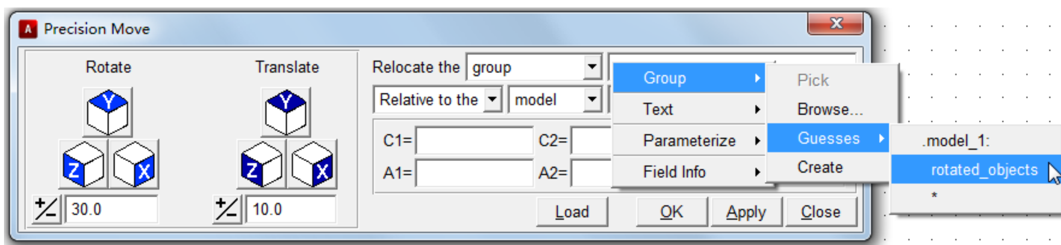


图7-170　输入组

（11）设置下面的选项为 About the 和 marker，在后面的文本框中输入斜面的角标记点，如图 7-171 所示。

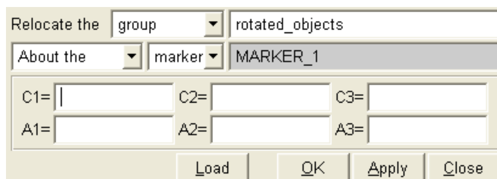


图7-171　设置参数

（12）在左侧 Rotate 按钮下方文本框中输入 5，即在原来旋转 15° 的基础上再旋转 5°。

（13）精确旋转对话框设置如图 7-172 所示。

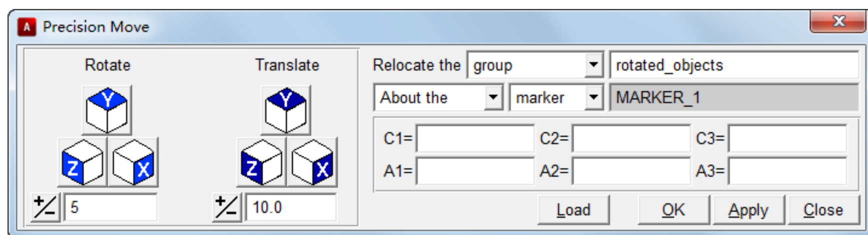


图7-172　精确旋转对话框

（14）设置完毕，单击 Rotate 下方的 Z 按钮，实现组的逆向旋转，关闭旋转对话框。

（15）斜面定位完毕，单击仿真按钮开始仿真。滑块在斜面上滑动。

（16）重复上述步骤，从倾斜角度 20º 开始逐次递减 0.5º，旋转该组，并进行仿真，可以发现在 17.5º 时滑块仍然可以滑动，当旋转至 16º 时滑块不能滑动。

7.7 起重机

本例利用 ADAMS/View 建立图 7-173 所示的起重机，起重机尺寸如图 7-174、图 7-175 所示。

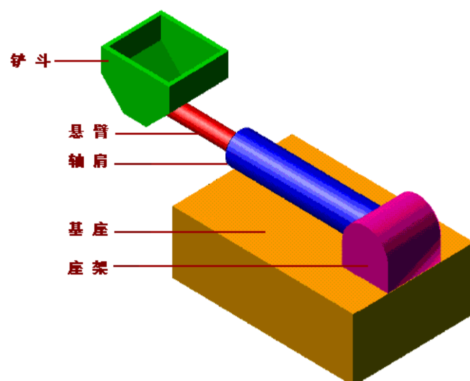


图7-173　起重机

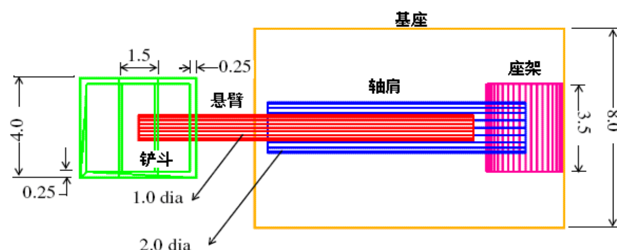


图7-174　起重机尺寸俯视图

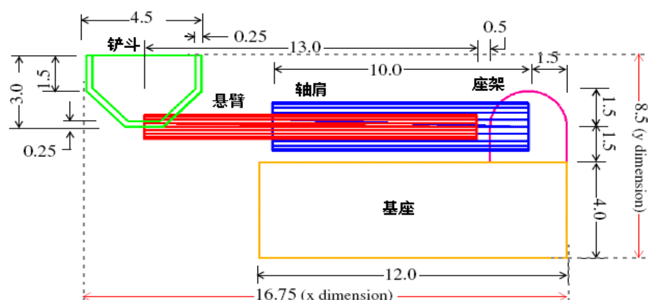


图7-175　起重机尺寸主视图

7.7.1　启动 ADAMS

（1）运行 ADAMS 2012，在欢迎界面中选择 New Model，打开“Create New Model”对话框。

（2）Modal name 命名为 lift_mecha。

（3）确认 Gravity（重力）文本框中是 Earth Normal（-Global Y），Units（单位）文本框中是 MKS – m，kg，N，s，deg，如图 7-176 所示。确认后单击“OK”按钮。

（4）创建新模型后，在 ADAMS/View 工作窗口的左上角显示有模型的名称。如果 ADAMS/View 中没有默认设置为经典界面，请单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，可以将界面切换为经典界面。

（5）在 Settings 菜单选择 Working Grid。

（6）在打开的参数设置对话框中设置 Size 在 X 和 Y 方向均为 20m，Spacing 在 X 和 Y 方向均为 1m，如图 7-177 所示。

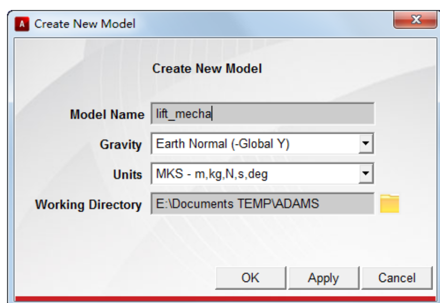


图 7-176　设置界面

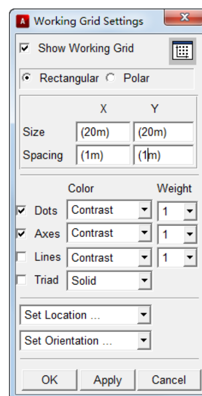


图 7-177　设置参数

（7）设置完毕单击“OK”按钮。

（8）通过调整工具箱中缩放按钮使窗口内显示所有的栅格。

（9）单击 F4 键打开坐标窗口。

7.7.2 建立模型

（1）查看窗口左下角的坐标系标记，确认在 x-y 平面。

（2）默认状态下，ADAMS 的图标单位是 mm，本例中需要设为 m。选择 Settings 菜单下的 Icons 命令，在打开的参数设置对话框中设置 New Size 为 1，如图 7-178 所示。

（3）右键选择实体按钮，在级联按钮中选择 Box 按钮。

（4）设置实体单元尺寸：On Ground、Length：12、Height：4、Depth：8。

（5）如图 7-179 所示设置完毕，在屏幕上中心坐标处单击鼠标，建立基座部分。

（6）用 Box 工具建立 Mount 座架部件，设置参数：New Part、Length： 3 、Height：3、Depth：3.5、

（7）设置完毕，在 Base 基座右上角建立 Mount 部件，如图 7-180 所示。

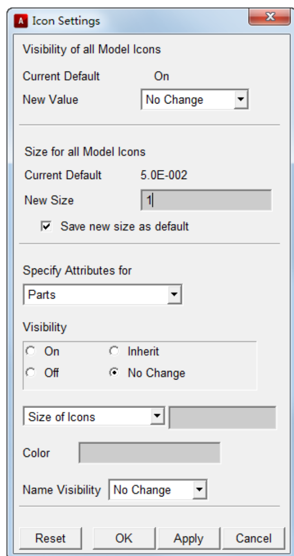


图 7-178 设置 Icons

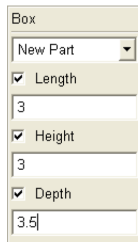


图 7-179 实体 Base 尺寸

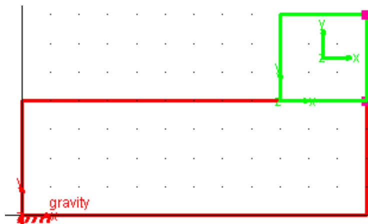


图 7-180 建立 Mount

（8）左键单击立体视角按钮，查看模型，如图 7-181 所示。可以看出，Mount 并不在 Base 的中间位置。下面对 Mount 位置进行调整。

（9）右键选择工具箱中的 Position 按钮在级联按钮中选择 Move 按钮。

（10）在打开的参数设置对话框中选择 Vector，Distance 项中输入 2.25m，如图 7-182 所示，实现 Mount 移动至 Base 中间位置。

（11）设置完毕，选择座架实体，移动方向箭头按 z 轴方向，完成座架的移动，如图 7-183 所示。

（12）右键选择座架，在快捷菜单中选择 Rename，如图 7-184 所示，命名为 mount，

如图 7-185 所示。

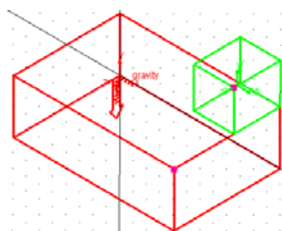


图 7-181　立体视图

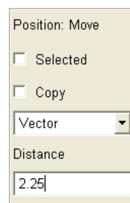


图 7-182　移动参数

创建轴肩之前，设置栅格位于座架中心处。

（13）选择 Settings 菜单中 Working Grid，在打开的参数设置对话框中选择 Set Location 以及 Pick，如图 7-186 所示。

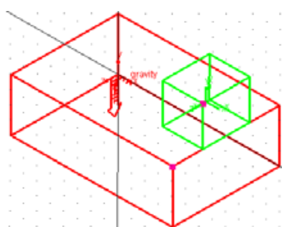


图 7-183　移动后的座架

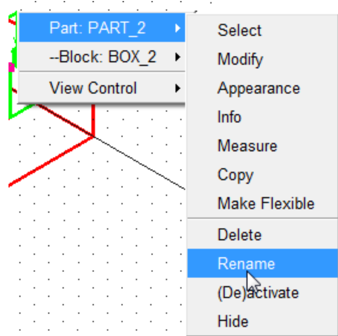


图 7-184　快捷菜单

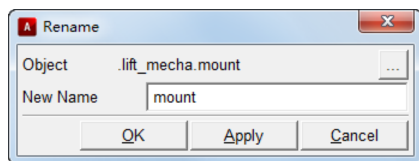


图 7-185　重命名

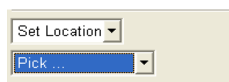


图 7-186　设置参数

（14）选择 Mount.cm，并选择 x 轴和 y 轴方向，选择完毕栅格位于基座中心处，如图 7-187 所示。

（15）为了确认是否设置正确，选择工具箱中的视角按钮，显示视图如图 7-188 所示。

（16）为了精确建立轴肩，把栅格间距改为 0.5。选择 Settings → Working Grid，修改 Spacing 在 x 和 y 为 0.5。

（17）在实体按钮中选择 Cylinder 按钮，设置参数如图 7-189 所示：New Part、Length：10m、Radius：1m。

（18）设置完毕选择座架的中心点，单击左侧确定轴肩方向，建立轴肩，单击三维视图按钮，显示结果如图 7-190 所示。

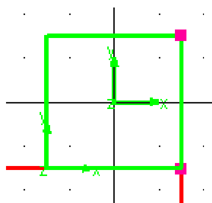


图7-187　显示栅格

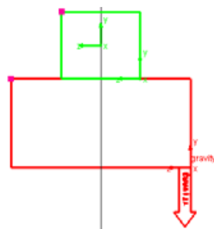


图7-188　调整视图方向

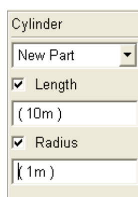


图7-189　设置参数

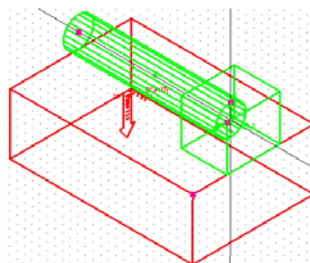


图7-190　建立轴肩

（19）右键单击轴肩，在打开的快捷菜单中选择 part.PART_3 → Rename，如图 7-191 所示，在打开的重命名对话框中命名为 shoulder，如图 7-192 所示。

（20）利用 Cylinder 工具建立悬臂的参数，如图 7-193 所示：New Part、Length：13m、Radius：0.5m。

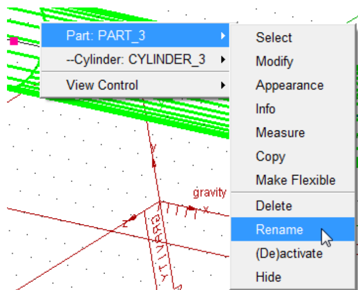


图7-191　快捷菜单

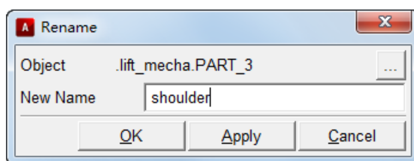


图7-192　重命名

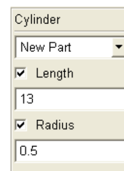


图7-193　设置参数

（21）选择 Mount.cm 作为创建点，方向同轴肩，建立悬臂如图 7-194 所示。

（22）选择悬臂，设移动方向沿 x 轴负向，实现悬臂的移动如图 7-195 所示。

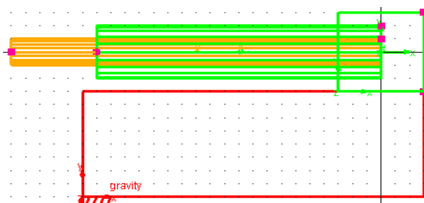


图7-194　建立悬臂

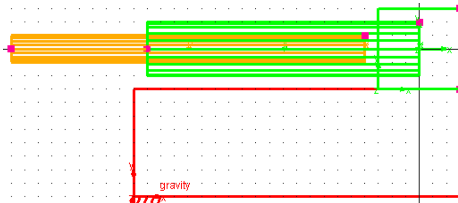


图7-195　移动悬臂

（23）右键选择新建的悬臂，在快捷菜单中选择 part_4 → Rename，命名为 boom。

（24）右键选择工具箱中的 Position 按钮在级联按钮中选择 Move 按钮。

（25）在打开的参数设置对话框中选择 Vector，Distance 项中输入 2m。如图 7-196 所示。

（26）右击实体按钮，在弹出的级联按钮中选择倒圆角工具，设置圆角半径为 1.5m。

（27）选择座架上侧的两条边，选择完毕按鼠标右键完成倒圆角，如图 7-197 所示。

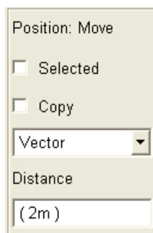


图 7-196　设置参数

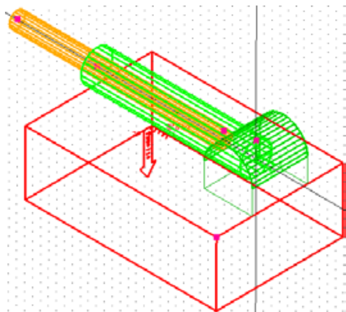


图 7-197　座架倒圆角

（28）选择 Box 按钮创建铲斗，如图 7-198 所示设置实体参数 New Part、Length：4.5m、Height：3.0 m、Depth：4.0 m。

（29）选择悬臂左侧中心点，命名为 bucket，建立铲斗如图 7-199 所示。



图7-198　设置参数

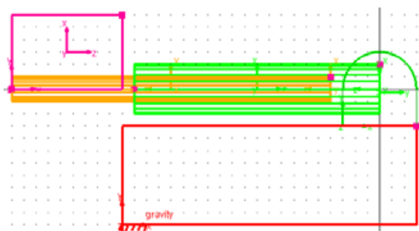


图7-199　建立铲斗

（30）右键选择工具箱 Position 按钮，在级联按钮中选择 Move 按钮。

（31）在打开的参数设置对话框中选择 Vector，Distance 输入 2.25m，如图 7-200 所示。选择铲斗，移动方向沿全部坐标系 x 轴负向，实现悬臂横向移动，如图 7-201 所示。

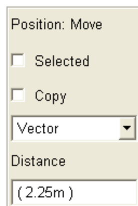


图 7-200　设置参数

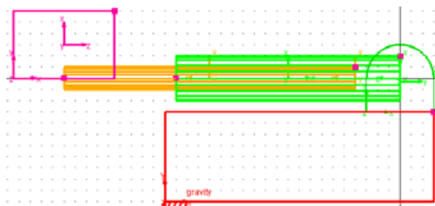


图 7-201　横向移动铲斗

（32）在工具箱中选择三维视图按钮以查看铲斗在 z 轴的方位。

（33）选择 Move 按钮，设置参数中选择 Vector，Distance 项中输入 2.0m，选择铲斗，移动方向沿全部坐标系 z 轴负向，实现悬臂的纵向移动。

（34）移动完毕，选择工具箱中的 Render 渲染按钮 Render ，三维效果如图 7-202 所示。再次单击 Render 按钮，效果图则以线框形式显示，如图 7-203 所示。

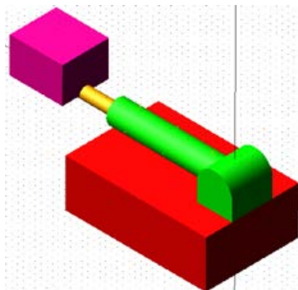


图 7-202　渲染图

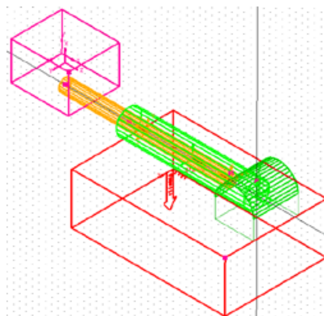


图 7-203　线框图

（35）右键单击实体按钮，在弹出的级联按钮中选择倒角工具，在打开的参数设置对话框中设置倒角 Width 为 1.5m，如图 7-204 所示。

（36）选择铲斗下侧的两条边，选择完毕单击右键，完成的倒角如图 7-205 所示。



图 7-204　设置参数

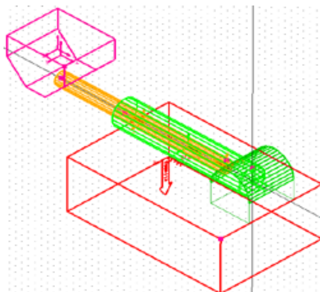


图 7-205　铲斗倒角

（37）右键选择工具箱 Solid 实体按钮，在级联按钮中选择 Hollow 按钮，在打开的参数设置对话框中设置参数 Thickness 为 0.25m，如图 7-206 所示。

（38）选择铲斗作为挖空对象，选择铲斗上表面作为工作表面，选择完毕单击鼠标右键完成挖空操作，如图 7-207 所示。

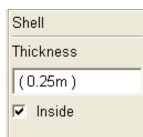


图7-206　设置参数

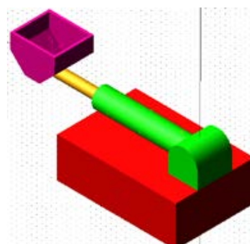


图7-207　挖空的铲斗

（39）右键单击窗口右下角 Information 按钮，在级联按钮中选择模型部件拓扑关系按钮，查看是否有多余的部件，根据模型要求，包括 Ground 地面，共有 6 个部件。如图 7-208 所示。

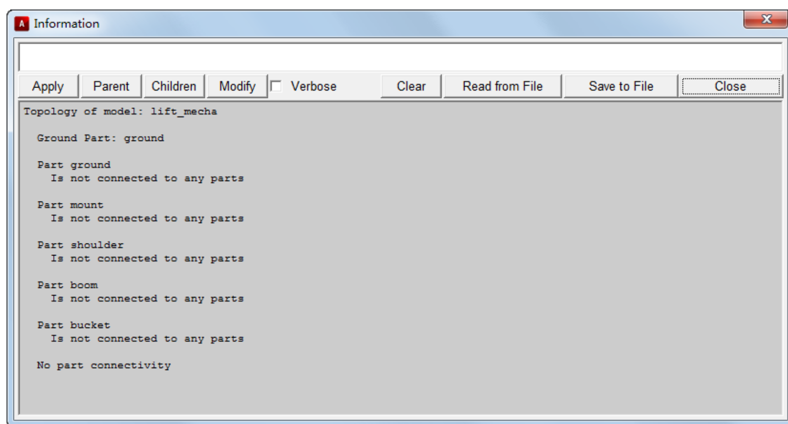


图7-208　信息窗口

7.7.3　添加约束

模型建立完毕，接下来在模型中添加约束，如图 7-209 所示。

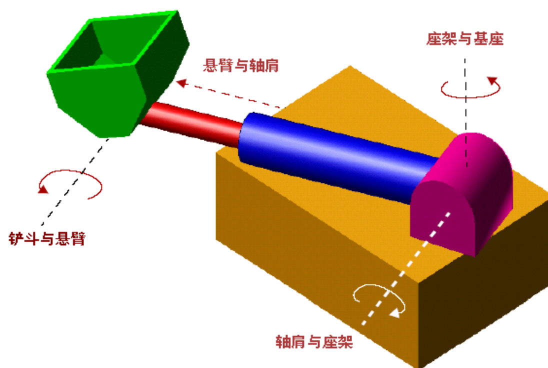


图7-209　模型中的约束

（1）在工具箱中选择转动副，在打开的参数设置对话框中设置 2 Bod – 1 Loc 和 Pick Feature，如图 7-210 所示。

选择基座和座架，然后选择座架中心 Mount.cm，旋转轴沿 y 轴正向，建立座架与基座间的转动副，如图 7-211 所示。

（2）用转动副按钮建立轴肩与座架间的转动副，参数设置为 2 Bod-1 Loc 和 Normal to Grid，选择轴肩和座架，再选择座架中心点，建立转动副，如图 7-212 所示。

（3）用转动副按钮建立铲斗与悬臂间的转动副，参数设置为 2 Bod-1 Loc 和 Normal to Grid，选择铲斗和悬臂，再选择铲斗下侧中心点，建立转动副，如图 7-213 所示。

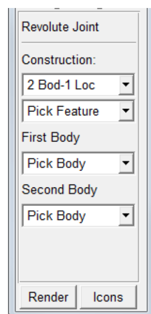


图7-210 设置参数

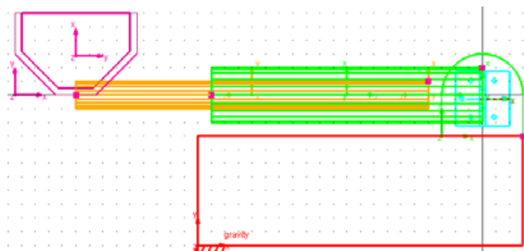


图7-211 座架与基座间的转动副

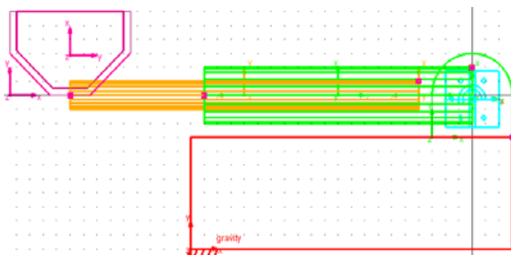


图7-212 轴肩与座架间的转动副

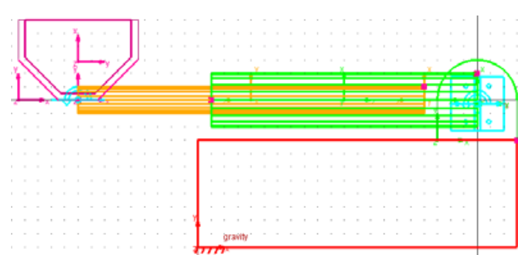


图7-213 铲斗与悬臂间的转动副

（4）在工具箱中选择平动副，设置 2 Bod - 1 Loc 和 Pick Feature，选择悬臂和轴肩，然后选择悬臂中心标记点，移动方向沿 X 轴正向，建立悬臂与轴肩间的平动副，如图 7-214 所示。

（5）右键单击窗口右下角的 Information 信息按钮，在级联按钮中选择模型约束拓扑关系按钮，查看是否有部件未按要求约束，如图 7-215 所示，确定全部正常约束后关闭信息窗口。

（6）模型验证完毕，选择仿真按钮运行仿真，可以看到受重力作用，模型各部件可以正常运动。

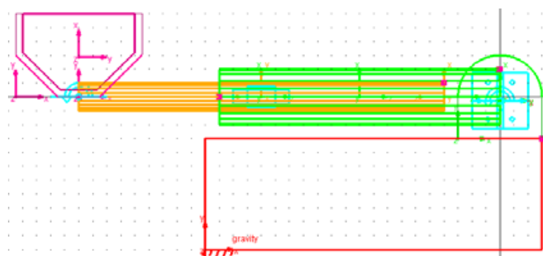


图7-214 悬臂与轴肩间的平动副

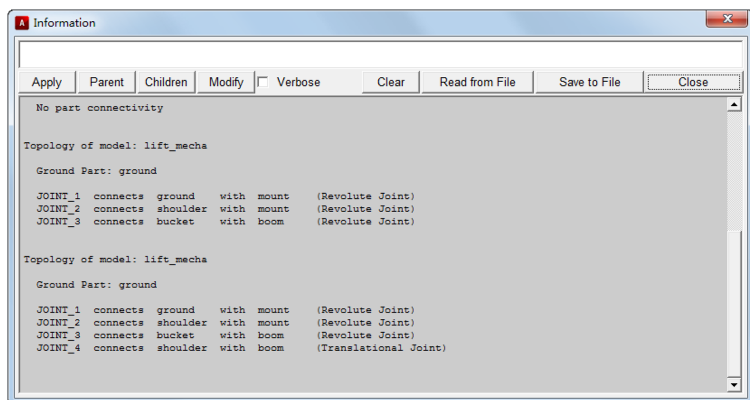


图7-215　信息窗口

7.7.4　添加运动

（1）选择工具箱中的旋转运动按钮，右键单击座架中心标记点，由于此处有多个连接，在弹出的选择窗口内选择 JOINT_1（mount 与 ground 之间的约束），如图 7-216 所示，给座架与基座的转动副添加旋转运动。

（2）选择俯视图按钮，可以清楚地看见旋转运动的箭头图标，如图 7-217 所示。

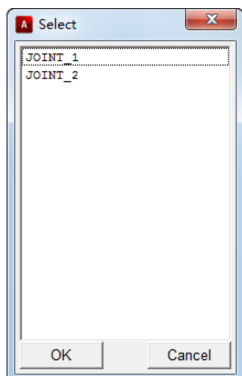


图7-216　选择约束

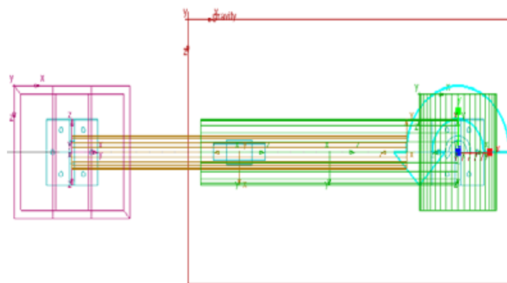


图7-217　座架与基座的旋转运动

（3）右键单击该运动，在弹出的快捷菜单中选择 Motion_1 → Rename，为便于区分，更名为.life_mecha.MOTION_mount_ground，如图 7-218 所示。

（4）更名完毕，右键单击该运动，在弹出的快捷菜单中选择 Motion_mount_ground → Modify。

（5）在修改对话框中修改 Function 项为 360.0d*time，如图 7-219 所示。

（6）重复上述步骤，在轴肩与座架间建立旋转运动 Motion_shoulder_mount，如图 7-220 所示。

（7）修改该运动的 Function 为-STEP（time，0，0，0.10，30d），如图 7-221 所示。如果函数较长，在修改对话框中单击 Function 文本栏后面的 Function Builder 按钮 ...，

在函数编辑器窗口中输入完整的函数，如图 7-222 所示。函数可手动输入，也可通过选择 Math Function 的下拉菜单中的函数库实现，需要注意的是，函数应按照书中所示格式，否则会出现错误。

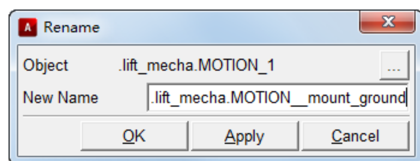


图7-218　给运动更名

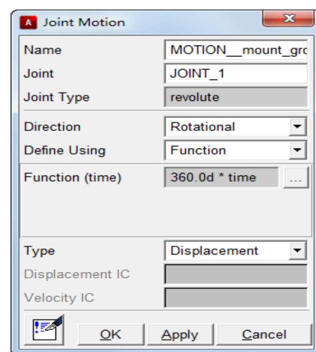


图7-219　修改运动函数

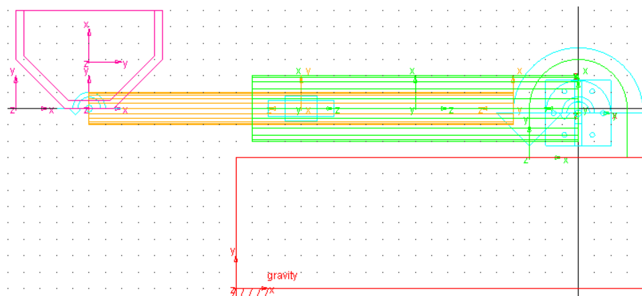


图7-220　轴肩与座架间的旋转运动

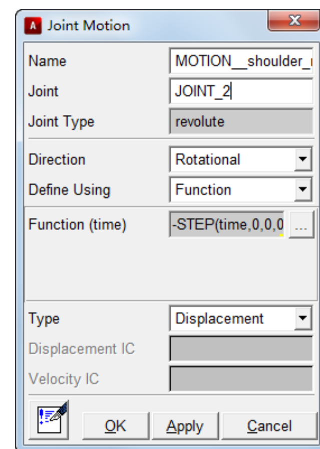


图7-221　修改运动函数

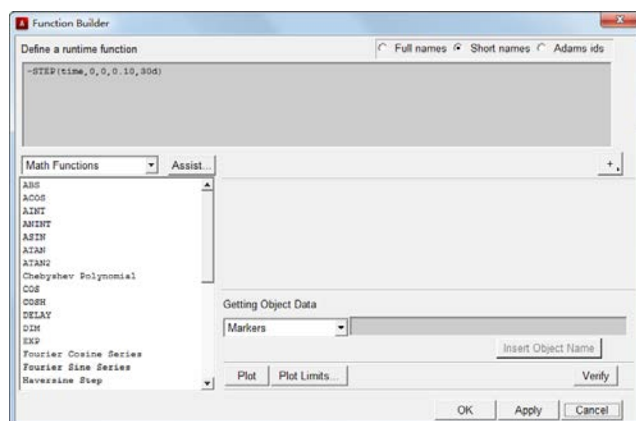


图7-222　函数编辑器

（8）重复上述步骤，在铲斗与悬臂间建立旋转运动 Motion_bucket_boom，如图 7-223 所示。

（9）设置运动函数为 45d*（1-cos（360d*time））。

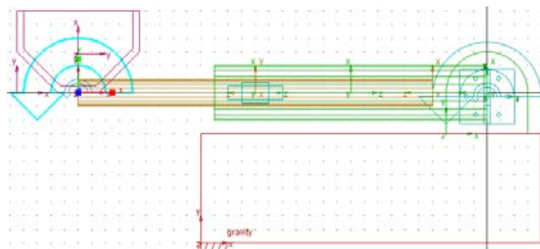
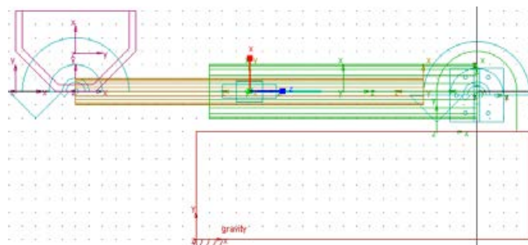


图7-223　铲斗与悬臂间的旋转运动图

（10）右键选择工具箱中的旋转运动按钮，在级联按钮中选择平行运动按钮，单击悬臂中心平动副，在悬臂与座架间建立平行运动，如图 7-224 所示。



7-224　悬臂与轴肩间的平行运动

（11）命名平动为 Motion_boom_shoulder，设置运动函数 STEP（time，0.8，0，1，5）。

（12）所有的运动添加完毕，在工具箱中选择 Simulation 按钮，设置仿真参数 End Time 为 5，Steps 为 50，如图 7-225 所示，进行仿真。各部件运动方向的改变可以通过修改运动函数的正负来实现，比如在 STEP（time，0.8，0，1，5）前加负号。

（13）座架在旋转的同时，轴肩沿座架旋转，悬臂沿轴肩伸缩，铲斗翻转，如图 7-226 所示。

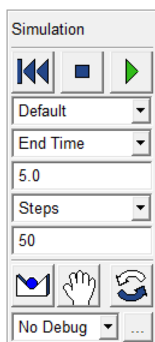


图7-225　设置参数

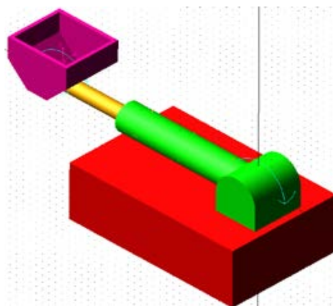


图7-226　仿真界面

7.8 弹簧阻尼器

本例建立图 7-227 所示的弹簧阻尼器，分析线性弹簧和非线性弹簧时的系统特性。

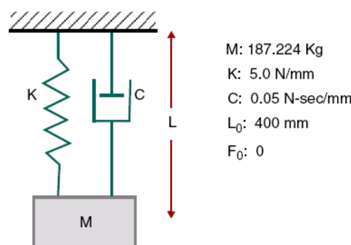


图 7-227　弹簧阻尼器

7.8.1　启动 ADAMS

（1）运行 ADAMS 2012，在欢迎界面中，选择 New Model，打开“Create New Model”对话框。

（2）Model Name 输入 Spring_mass，确认 Gravity（重力）文本框中是 Earth Normal（-Global Y），Units（单位）文本框中是 MMKS – mm，kg，N，s，deg。

（3）单击 F4 键打开坐标窗口。

（4）创建新模型后，在 ADAMS/View 工作窗口的左上角显示有模型的名称。如果 ADAMS/View 中没有默认设置为经典界面，请单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，可以将界面切换为经典界面。

7.8.2　建立模型

（1）在主工具箱中选择 Box 工具按钮建立一质量块，用默认尺寸即可。

（2）在屏幕任意位置单击鼠标创建质量块，如图 7-228 所示。

（3）右键单击质量块，选择 Part：part_2 → Rename，更名为 mass。

（4）右键单击质量块，选择 Part：mass → Modify。

（5）在打开的对话框中修改 Define mass by 项为 User Input，在 Mass 栏输入 187.224，如图 7-229 所示。

（6）选择右视图按钮查看质量块的位置，进行调整使栅格位于质量块的中心。选择 Edit 菜单下的 Move 项，在对话框中选择 Relocate the 项为 Part，右键单击右侧文本框选择 Part → Guesses → mass，如图 7-230 所示。

（7）在 Translate 下方的数字栏中输入-100.0，或输入 100 再单击前面的符号按钮

，如图 7-231 所示。

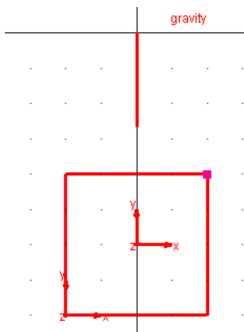


图 7-228　建立质量块

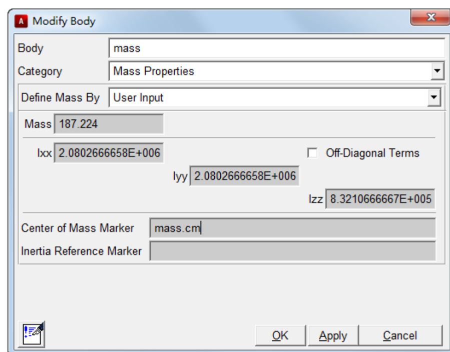


图 7-229　修改质量

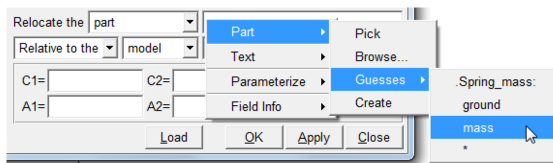


图 7-230　选择移动质量块

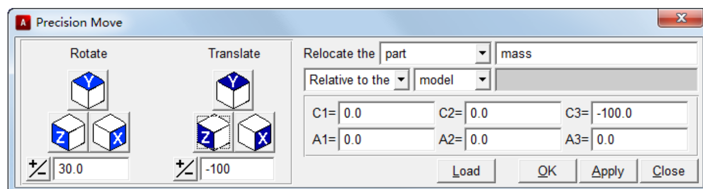


图 7-231　移动对话框

（8）设置完毕，单击 Z 轴方向按钮，使质量块中心位于工作栅格位置，如图 7-232 所示。

（9）选择正视图按钮，显示栅格便于建模。

（10）为了确保质量块的运动只沿 y 轴移动，添加一平动副。选择工具箱中的平动副按钮，选择质量块和大地为对象，y 轴为运动方向，如图 7-233 所示。

（11）选择工具栏中的弹簧阻尼器按钮，设置参数 K 为 5.0、C 为 0.05，如图 7-234 所示。

（12）设置完毕，选择质量块中心点，以及单击沿 y 轴向上 400mm 的位置，即相当于与大地建立弹簧连接，如图 7-235 所示。

（13）为了确定弹簧在空载时长度为 400mm，选择菜单栏中 Tools 菜单中的 Measure distance，在测量对话框中 First Position 栏单击鼠标右键，选择 Position → Pick，选择质量块的中心点 mass.cm，在 Second Position 栏单击鼠标右键，选择 Position → Pick，选择弹簧的上顶点 ground.MARKER_5，如图 7-236 所示。

（14）设置完毕单击“OK”按钮。测量信息窗口如图 7-237 所示，y 轴=-400.0mm。

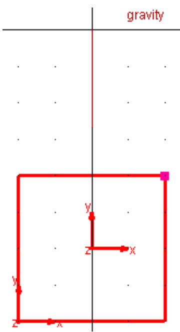


图 7-232　移动后的质量块

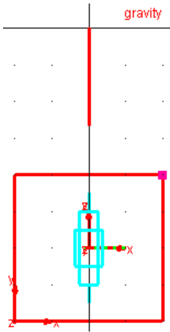


图 7-233　添加平动副

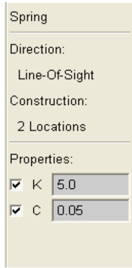


图 7-234　设置弹簧

下面测试静平衡时弹簧力的大小。

（15）选择工具箱中的仿真按钮，选择工具箱下侧的计算静平衡按钮，计算成功，出现提示如图 7-238 所示。

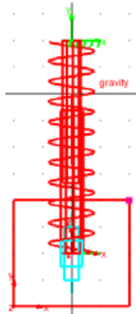


图 7-235　建立弹簧阻尼器

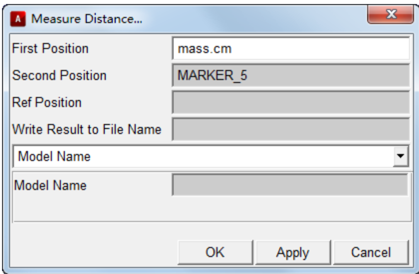


图 7-236　测量对话框

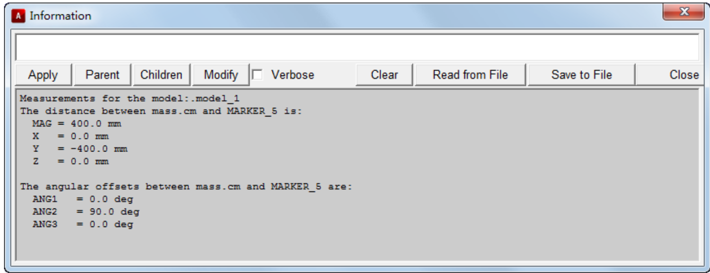


图 7-237　测量信息窗口

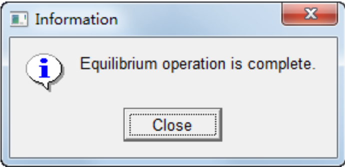


图 7-238　系统提示

（16）计算完毕单击返回按钮，右键单击弹簧选择 Spring.SPRING_1 → Measure，如图 7-239 所示。

（17）在打开的测量对话框中 Characteristic 选择 force，在 Measure Name 栏输入 spring_force，如图 7-240 所示，单击“OK”按钮，建立一测量力的窗口。为了只测量力的大小，在测量窗口内单击鼠标右键并选择 Measure modify，在修改力函数对话框中加上绝对值函数 ABS（），如图 7-241 所示。

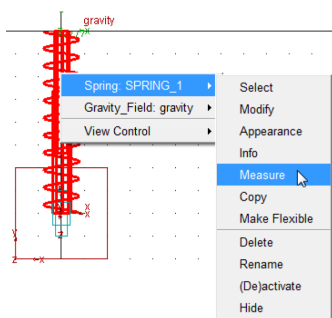


图7-239　测量弹簧力

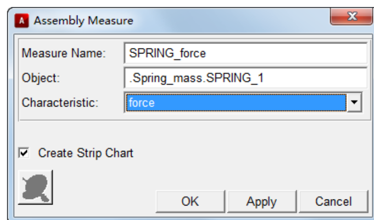


图7-240　测量对话框

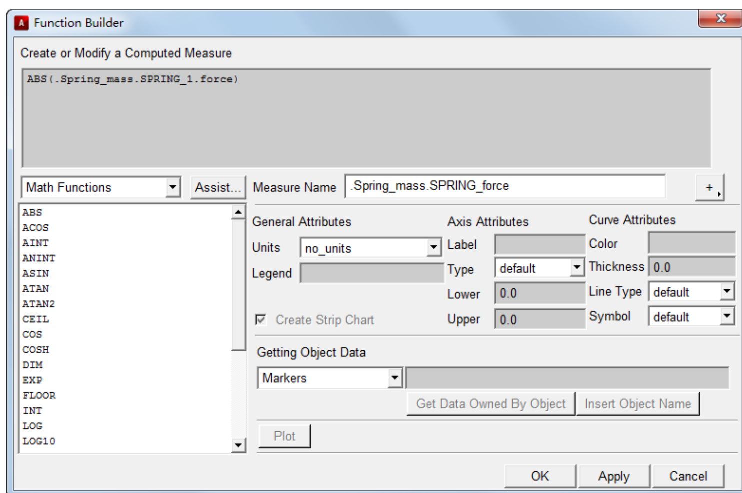


图7-241　修改测量力函数

（18）根据弹簧力测量曲线，起始位置即静平衡时弹簧力为 1836N，即质量块的重力：187.224kg*9807.65mm/s^2（=1837.04 N）。

（19）测量弹簧的变形曲线。右键单击弹簧选择 Spring_1 → Measure，在打开的测量对话框中 Measure name 输入 Spring_displace，Characteristic 选择 Deformation，建立空白的位移测量窗口。

（20）选择工具箱中的仿真按钮，设置仿真时间 End Time 为 2，Steps 为 50，开始仿真，位移曲线如图 7-242 所示。

（21）在力测量曲线窗口空白处单击鼠标右键，选择 plot：schtl → Transfer to full plot，切换到 ADAMS/PostProcessor 窗口。

（22）单击 Clear plot 按钮清除窗口内的曲线。在 Result Set 选项中选择 spring_force 下，选择 component 下的 Q 分量，如图 7-243 所示。

（23）在 Independent Axis 项选择 Data 项，如图 7-244 所示。在弹出的选择窗口选择 spring_displace，在 Component 中选择 Q，如图 7-245 所示。

（24）选择完毕单击“OK”按钮。

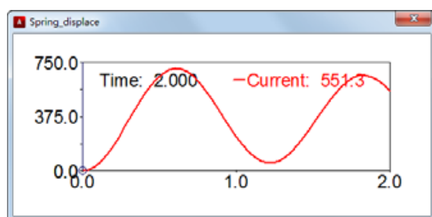


图7-242　弹簧变形曲线

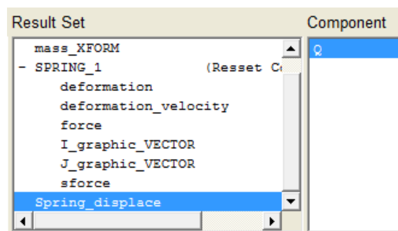


图7-243　参数设置

（25）单击 Add curves 按钮添加新选择的曲线，即以 x 轴为 Spring_displace，y 轴为 spring_force，如图 7-246 所示。

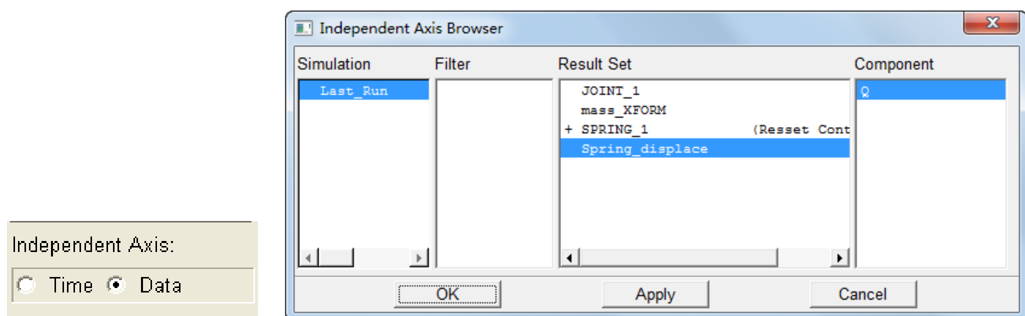


图7-244　参数设置　　　　　　　　图7-245　选择 Independent Axis

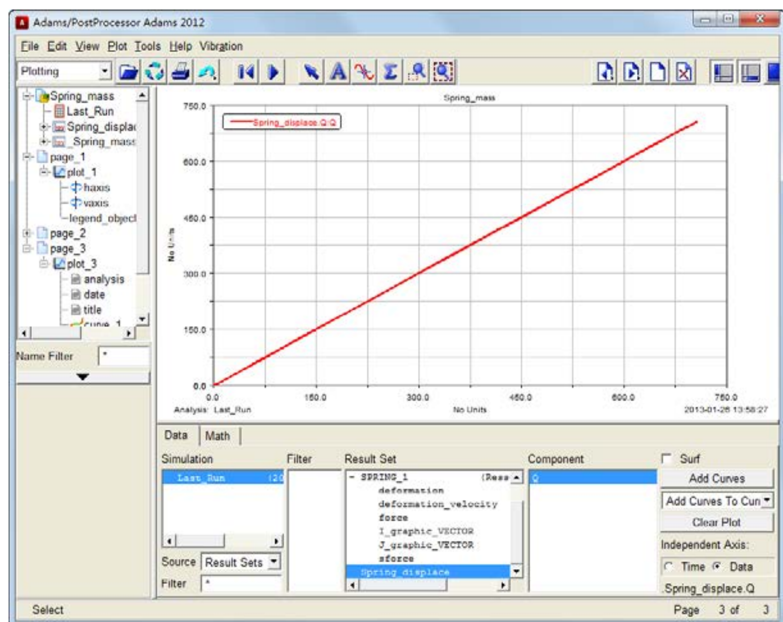


图7-246　力与位移的关系曲线

（26）下面计算模型的固有频率。单击 ADAMS/PostProcessor 窗口右上角的按钮返回建模界面。选择工具箱中的仿真按钮，选择工具箱下侧的计算静平衡按钮。

（27）计算完毕，选择菜单栏中 Simulation 菜单下 Interactive Controls 项，在仿真控制对话框中选择计算线性模态按钮对模型进行计算，计算完毕出现提示窗口如图 7-247 所示。

（28）选择 Animate，出现模态控制对话框，如图 7-248 所示，可以得到固有频率为 0.8222Hz。

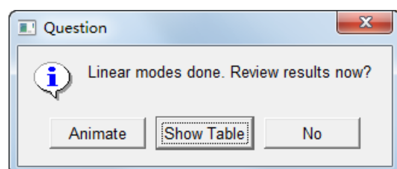


图 7-247　提示窗口

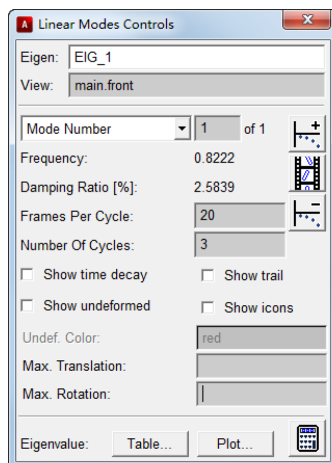


图 7-248　模态对话框

下面通过导入弹簧的刚度系数，把上面的线性弹簧改为非线性弹簧。

（29）新建文本文件 spring_data.txt，输入曲线测试数据，即对应的位移和作用力：

（-800，-10000），
（-600，-5000），
（-400，-2000），
（-200，-1000），
（0，0），
（200，1000），
（400，2000），
（600，5000），
（800，10000），
如图 7-249 所示。

（30）选择 File 菜单下的 Import，设置如下参数后单击“OK”按钮：

- File Type：Test Data。
- Create Splines。
- File to Read：spring_data.txt。
- Independent Column Index：1。
- Units：force。
- Model Name：spring_mass。

如图 7-250 所示。

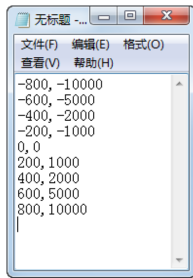


图7-249 数据文件

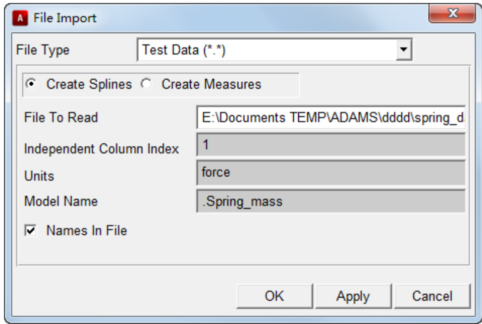


图7-250 导入对话框

（31）选择 Build 菜单下的 Data Elements → Spline → Modify，如图 7-251 所示。

（32）在打开的数据浏览窗口中选择 SPLINE_1，如图 7-252 所示。完成后单击“OK”按钮。

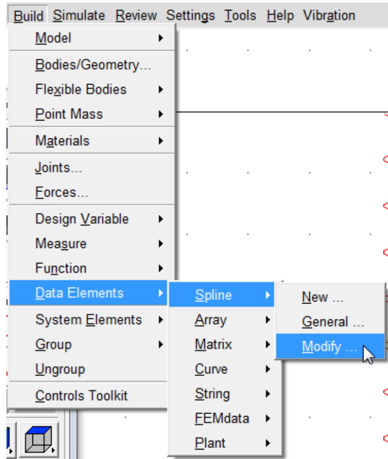


图7-251 修改Spline

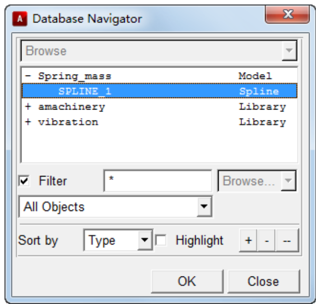


图7-252 数据浏览器窗口

（33）在打开的修改 Spline 对话框中设置右上角的 View as 为 Plot，观察变形量（X 轴）与作用力（y 轴）的关系，如图 7-253 所示。

（34）右键单击弹簧，选择 Spring_1 → delete，在打开的对话框中单击 delete all 按钮。

（35）右键单击工具箱 Connecter 按钮，在级联按钮中选择 Force 按钮，参数设置：

- Run-time Direction：Two Bodies。
- Characteristic：Custom。

如图 7-254 所示。

（36）选择质量块和大地为作用对象，选择质量块中心及其以上 400mm 位置作为作用点建立作用力，如图 7-255 所示。

（37）在弹出的修改力对话框中，单击 Function Builder 按钮打开函数编辑器，并

输入：-AKISPL（DM（Marker_8，cm） -400，0，Spline_1，0），如图 7-256 所示，其中 Marker_8 为对应于物体上方 400mm 处的标记点。

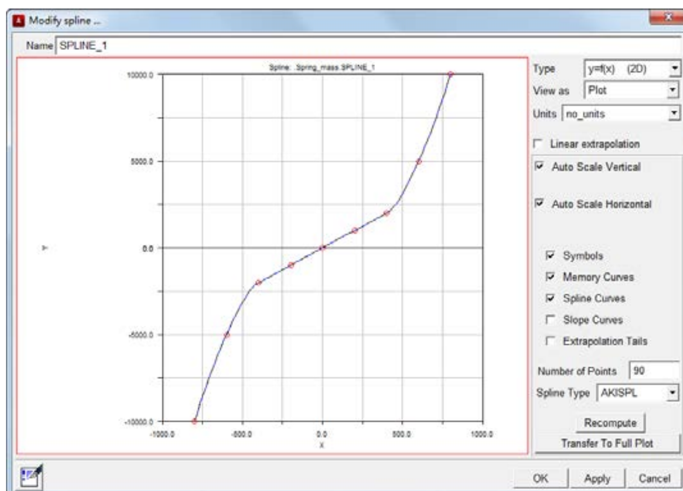


图7-253　变形量（X轴）与作用力（Y轴）的关系

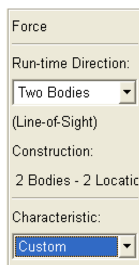


图7-254　设置参数

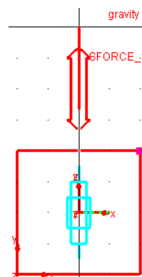


图7-255　建立作用力

（38）重复步骤（16）～（19），建立对非线性弹簧阻尼的测量力 non_linear_force 以及变形 non_linear_displace，窗口设置如图 7-257、图 7-258 所示。

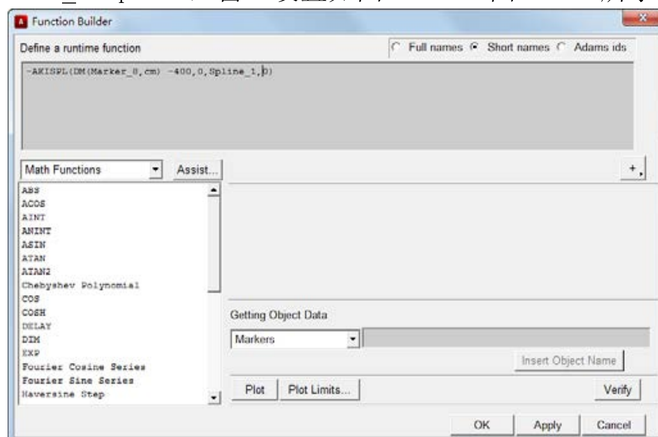


图7-256　函数编辑器

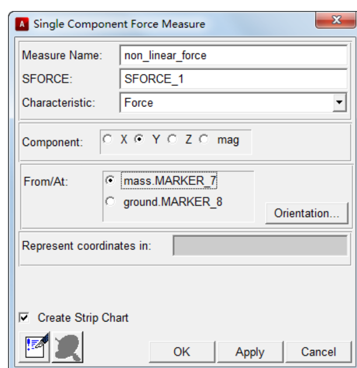


图7-257　测量力对话框

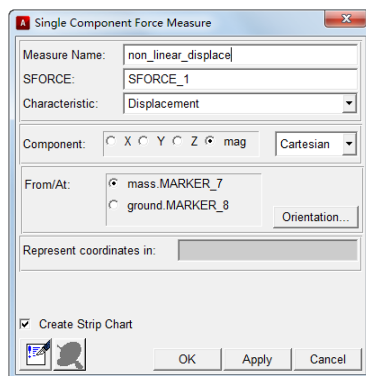


图7-258　变形测量对话框

（39）选择工具箱中的仿真按钮，设置参数：End time=5.0，Steps=200，进行仿真。

（40）力测量曲线以及变形曲线如图 7-259、图 7-260 所示。

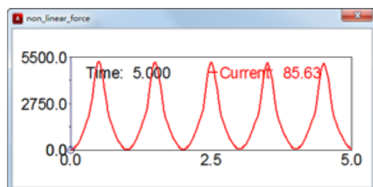


图7-259　力测量曲线

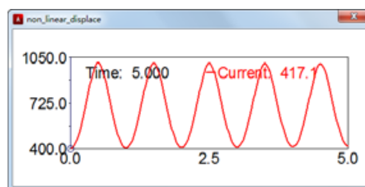


图7-260　变形测量曲线

（41）进行仿真观察作用力与变形量的关系，如图 7-261 所示。

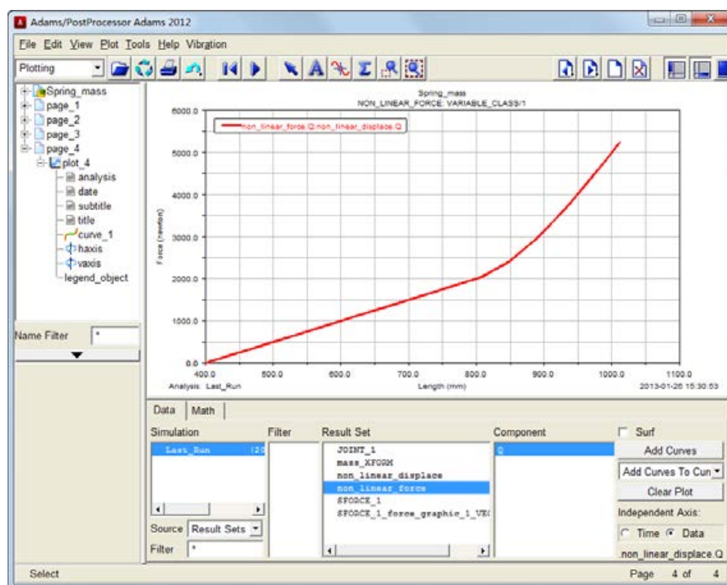


图 7-261　作用力与位移的非线性关系

第 8 章 参数化建模及优化设计

本章将通过一个具体的工程实例，介绍 ADAMS/View 的参数化建模及其提供的 3 种类型的参数化分析方法：设计研究(Design Study)、试验设计 (Design of Experiments，常简称为 DOE)和优化分析(Optimization)。通过本章学习，可以初步了解 ADAMS 参数化建模和优化的功能。

学 习 要 点

- ADAMS 参数化建模
- ADAMS 参数化分析
- 参数化建模实例——夹紧机构
- 优化设计实例——夹紧机构

8.1 ADAMS 参数化建模

ADAMS 提供了强大的参数化建模功能。在建立模型时，根据分析需要确定相关的关键变量，并将这些关键变量设置为可以改变的设计变量。在分析时，只需要改变这些设计变量值的大小，虚拟样机模型自动得到更新。如果需要仿真根据事先确定好的参数进行，可以由程序预先设置好一系列可变的参数，ADAMS 自动进行系列仿真，以便于观察不同参数值下样机性能的变化。进行参数化建模时，确定好影响样机性能的关键输入值后，ADAMS/View 提供了 4 种参数化的方法：

（1）参数化点坐标：在建模过程中，点坐标用于几何形体、约束点位置和驱动的位置。点坐标参数化时，修改点坐标值，与参数化点相关联的对象都得以自动修改。

（2）使用设计变量：通过使用设计变量，可以方便地修改模型中已被设置为设计变量的对象。如可以将连杆的长度或弹簧的刚度设置为设计变量，当设计变量的参数值发生改变时，与设计变量相关联的对象的属性也得到更新。

（3）参数化运动方式：通过参数化运动方式，可以方便地指定模型运动方式和轨迹。

（4）使用参数表达式：使用参数表达式是模型参数化的最基本的一种参数化途径。当以上 3 种方法不能表达对象间的复杂关系时，可以通过参数表达式进行参数化。

参数化的模型可以使用户方便地修改模型而不用考虑模型内部之间的关联变动，而且可以达到对模型优化的目的。参数化机制是 ADAMS 中重要的机制。

8.2 ADAMS 参数化分析

参数化分析有利于了解各设计变量对样机性能的影响。在参数化分析过程中，根据参数化建模时建立的设计变量，采用不同的参数值进行一系列的仿真，根据返回的分析结果进行参数化分析，得出一个或多个参数变化对样机性能的影响，然后进一步对各种参数进行优化分析，得出最优化的样机。ADAMS/View 提供的 3 种类型的参数化分析方法包括：设计研究（Design Study）、试验设计（Design of Experiments，即 DOE）和优化分析（Optimization）。

8.2.1 设计研究（Design Study）

建立好参数化模型，在仿真过程中，当取不同的设计变量，或者当设计变量值的大小发生改变时，样机的性能将会发生变化。而样机的性能怎样变化，这是设计研究主要考虑的内容。在设计研究过程中，设计变量按照一定规则在一定范围内取值，根据设计变量值的不同，进行一系列仿真分析。在完成设计研究后，输出各次仿真分析的结果。

通过各次分析结果的研究，用户可以得到以下内容：

（1）设计变量的变化对样机性能的影响。

（2）设计变量的最佳取值。

（3）设计变量的灵敏度，即样机有关性能对设计变量值的变化的敏感程度。

8.2.2　试验设计（Design of Experiments）

试验设计（Design of Experiments， DOE）考虑在多个设计变量同时发生变化时，各设计变量对样机性能的影响。试验设计包括设计矩阵的建立和试验结果的统计分析等。最初的试验设计（DOE）用在物理实验上面，但对于虚拟试验的效果也很好。传统上的 DOE 是费时费力的。使用 ADAMS 的 DOE 可以增加获得结果的可信度，并且在得到结果的速度上比试错法试验或者一次测试一个因子的试验更快，同时更有助于用户更好地理解和优化机械系统地性能。

对于简单的设计问题，可以将经验知识，试错法或者施加强力的方法混合使用来探究和优化机械系统的性能。但当设计方案增加时，这些方法也就不能得出快速系统化、公式化的答案。一次改变一个因素（也称设计参数，Factors）不能给出因素之间相互影响的信息，而进行多次仿真同时测试多个不同的因素会得到大量的输出数据让用户评估。为了减少耗时的工作，ADAMS/Insight 提供一个定制计划和分析工具进行一系列的试验，并且 ADAMS/Insight 帮助确定相关的数据进行分析，并自动完成整个试验设计过程。

总之，ADAMS 中的 DOE 是安排试验和分析试验结果的一整套步骤和统计工具，试验的目的是测量虚拟样机模型的性能、制造过程的产量、或者成品的质量。

DOE 一般有以下 5 个基本步骤：

（1）确定试验目的。如想确定哪个变量对系统影响最大。

（2）为系统选择想考察的因素集，并设计某种方法来测量系统的响应。

（3）确定每个因素的值，在试验中将因素改变以考察对试验的影响。

（4）进行试验，并将每次运行的系统性能记录下来。

（5）分析在总的性能改变时，哪些因素对系统的影响最大。

对设计试验的过程的设置称为建立矩阵试验（设计矩阵）。设计矩阵的列表示因素，行表示每次运行，矩阵中每个元素表示对应因素的水平级（即可能取值因子，Levels），是离散的值。设计矩阵给每个因素指定每次运行时的水平级数，只有根据水平级才能确定因素在运算时的具体值。

创建设计矩阵通常有 5 种方法：

- Perimeter Study：测试分析模型的健壮性。
- DOE Screening（2-level）：确定影响系统行为的某因素和某些因素的组合；确定每个因素对输出会产生多大的影响。

- DOE Response Surface（RSM）：对试验结果进行多项式拟合。
- Sweep Study：在一定范围内改变各自的输入。
- Monte Carlo：确定实际的变化对设计功能上的影响。

创建好设计矩阵后，需要确定试验设计的类型。在 ADAMS/Insight 中有 6 种内置设计类型创建设计矩阵，也可以导入自己创建的设计矩阵。可以自由选择设计矩阵，为系统创建最有效率的试验。

当使用内置的设计类型时，ADAMS/Insight 根据选择的设计类型生成相应的设计矩阵。这 6 种设计类型是 Full Factorial、Plackett-Burman、Fractional Factorial、Box-Behnken Central、Composite Faced（CCF）、D-Optimal。

（1）Full Factorial 是所有设计类型中综合程度最高的，使用到了因素水平的所有可能的组合。

（2）Plackett-Burman 设计类型适用于在大量的因素中筛选最有影响的因素。该设计所需要的传统设计类型运行的次数最少，但不允许用户估计这些因素之间的相互的影响。

（3）Fractional Fractorial 和 Plakett-Burman 使用的是 Full Factorial 专门的子集，因而也被看作简化的 Factorial。它普遍用于筛选重要变量并主要用于两水平的因素，能够估计其对系统的影响。

（4）Box-Behnken 设计类型使用设计空间中平面上的点。这样该设计就适用于模型类型为二次的 RSM 试验。Box-Behnken 对每个因素需要 3 个水平。

（5）CCF（Center Composite Faced）设计类型使用的是每个数据轴上的点（开始点），以及设计空间的角点（顶点），和一个以上的中心点。CCF 与 Box-Behnken 相比较运行的次数更多，适用于二次 RSM 试验的模型类型。

（6）D-Optimal 设计类型产生的是将系数不确定性降到最低的模型。这种设计类型由根据最小化规则从大量候选因素中随机抽取的行所组成。D-Optimal 指明了在试验中运行的总次数，将以前试验中已存在的行提供给新的试验，并对每个因素指定不同的水平。这些特性使得 D-Optimal 在很多情况，特别是在试验费用惊人的情况下，成为最佳选择。

8.2.3 优化分析（Optimization）

ADAMS 环境提供了参数化建模与系统优化功能。在建立模型时，根据分析需要确定相关的关键变量，并将这些关键变量设置为可以改变的设计变量。

优化是指在系统变量满足约束条件下使目标函数取最大值或者最小值。目标函数是用数学方程来表示模型的质量、效率、成本、稳定性等。使用精确数学模型的时候，最优的函数值对应着最佳的设计。目标函数中的设计变量对需要解决的问题来说应该是未

知量，并且设计变量的改变将会引起目标函数的变化。在优化分析过程中，可以设定设计变量的变化范围，施加一定的限制以保证最优化设计处于合理的取值范围。

另外对于优化来说，还有一个重要的概念是约束。有了约束才使目标函数的解为有限个，有了约束才能排除不满足条件的设计方案。

一般说来，优化分析问题可以归结为：在满足各种设计条件和在指定的变量变化范围内，通过自动地选择设计变量，由分析程序求取目标函数的最大值或最小值。

虽然 Insight 也有优化的功能，但两者有区别且互相补充。试验设计（DOE）主要通过改变这些设计变量值的大小，利用相对灵敏度分析结果研究哪些因素的影响比较大，并且还调查这些因素之间的关系；而优化分析着重于获得最佳目标值。试验设计可以对多个因素进行试验分析，确定哪个因素或者哪些因素的影响较大，然后利用优化分析的功能对这些影响较大的因素进行优化，这样可以有效提供优化分析算法的运算速度和可靠性。

8.3 参数化建模实例——夹紧机构

由于多体动力学仿真系统是复杂的系统，仿真模型中各个部件之间存在着复杂的关系，因此在仿真建模的时候需要提供一个良好的创建模型、修改模型机制，在对某个模型数据进行改变时，与之相关联的数据也随之改动，最终达到优化模型的目的。ADAMS 为多体动力学仿真建模提供了这样一个机制 ——参数化建模机制，它为用户设计、优化模型提供极大的方便。

在 8.1 节中对参数化建模做了简要的介绍，本节将主要以“夹紧”的夹紧机构为例，着重介绍点坐标的参数化建模。

8.3.1　夹紧机构模型简介

图 8-1 所示是一种称为“夹紧”的夹紧机构。夹紧机构包括：摇臂（Pivot）、手柄（Handle）、锁钩（Hook）、连杆（Slider）和固定块（Ground Block）等物体。其中，摇臂（Pivot）和大地（Ground）之间、摇臂（Pivot）和手柄（Handle）之间、手柄（Handle）和连杆（Slider）和锁钩（Hook）之间为铰链副；锁钩（Hook）和固定块（Ground Block）之间为点—面约束副；固定块（Ground Block）与大地（Ground）固结在一起；在手柄（Handle）有一个作用力，用于驱动机构运动，使其产生夹紧力；在锁钩（Hook）和大地（Ground）之间有一弹簧，用于测量夹紧机构的夹紧力。这种夹紧装置机构广泛应用于各种联接中，如集装箱门的锁紧等。试用虚拟样机技术对夹紧机构进行参数化建模和优化设计分析。

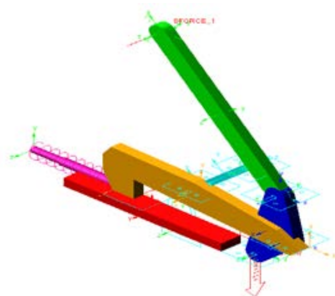


图 8-1　夹紧机构

8.3.2　启动 ADAMS/View 设置操作环境

（1）双击桌面上 ADAMS/View 的快捷图标，打开 ADAMS/View，在欢迎对话窗中选择 Create a new model 项，输入文件名 Latch，选择 OK 按钮，如图 8-2 所示。

（2）创建新模型后，在 ADAMS/View 工作窗口的左上角显示有模型的名称。如果 ADAMS/View 中没有默认设置为经典界面，请单击菜单栏中的“Settings”→“Interface Style”→“Classic”，可以将界面切换为经典界面。

（3）设置背景。在 Setting 菜单中选择 View Background Color 命令，如图 8-3 所示，ADAMS/View 将显示一个背景颜色选择对话框，自定义背景颜色为白色，取消渐进显示，如图 8-4 所示，单击 OK 按钮。

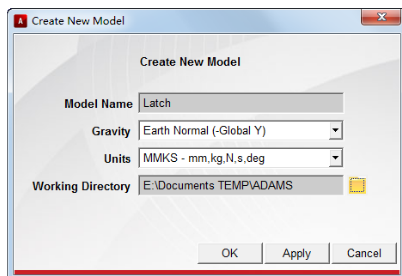


图 8-2　欢迎对话窗

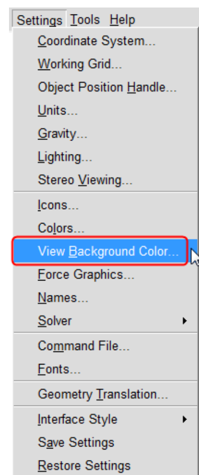


图 8-3　Setting 菜单

（4）设置单位。在 Setting 菜单，选择 Units 命令，如图 8-5 所示，显示单位设置对话框，在 Length 栏，选择 centimeter，采用自定义单位系统如图 8-6 所示，选择 OK 按钮。

（5）设置工作栅格。在 Setting 菜单，选择 Working Grid 命令，显示工作栅格设

置对话框；设置：size=25，spacing=1，如图 8-7 所示，选择 OK 按钮，设置好工作栅格。

（6）设置图标。在 Setting 菜单，选择 Icons 命令，显示图标设置对话框，在 New Size 栏，输入 2，如图 8-8 所示，选择 OK 按钮。

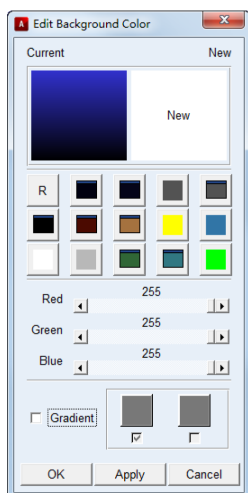


图 8-4　背景颜色设置对话框

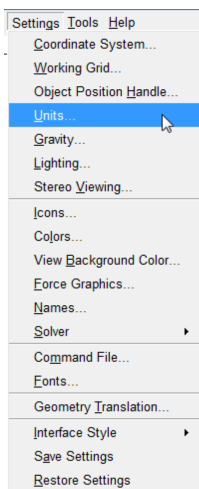


图 8-5　Setting 菜单

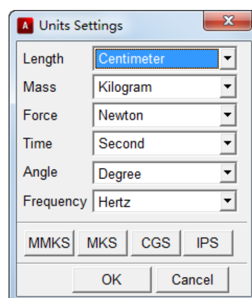


图 8-6　单位设置对话框

（7）调整视图。在主工具箱，选择动态选择视图工具放大栅格。

（8）检查重力设置。在 Settings 菜单，选择 Gravity 命令。当前的重力设置应该为：X=0，Y=-980.665，Z=0，选择 Gravity，如图 8-9 所示，选择 OK 按钮。

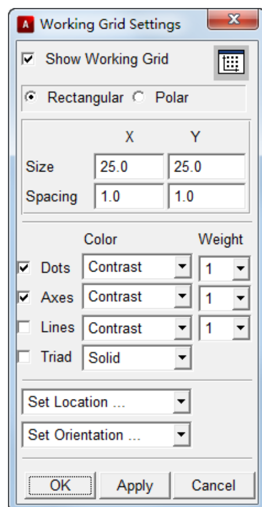


图 8-7　设置工作栅格对话框

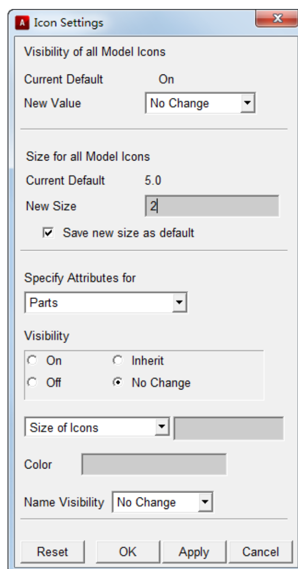


图 8-8　设置图标对话框

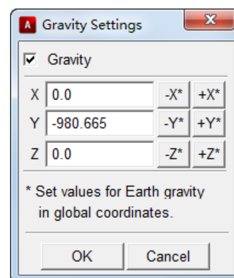


图 8-9　重力设置对话框

（9）按 F4 键显示坐标窗口，如图 8-10 所示。

（10）在 File 菜单选择 Select Directory 命令，如图 8-11 所示，设置 ADAMS 默认存盘目录，如图 8-12 所示。

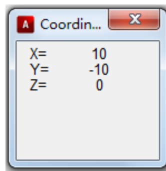


图 8-10 坐标窗口

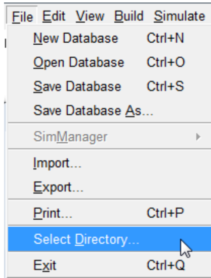


图 8-11 File 菜单

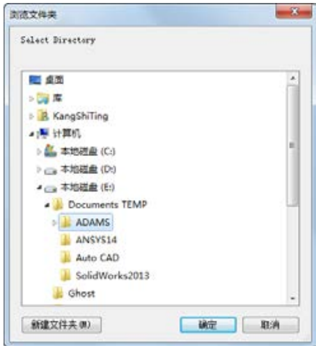


图 8-12 设置工作路径

8.3.3 建立夹紧机构模型

1. 创建参数化点

在主工具箱的几何建模工具集，选择 Point 工具；使用默认设置：Add to Ground 和 Don’t Attach，根据表 8-1 的坐标值，产生 A、B、C、D、E、F 6 个设计点，如图 8-13 所示。

表 8-1 定义参数化点及其坐标

设计点	变量名	x 坐标	y 坐标	z 坐标
A	POINT_1	0	0	0
B	POINT_2	3	3	0
C	POINT_3	2	8	0
D	POINT_4	-10	22	0
E	POINT_5	-1	10	0
F	POINT_6	-6	5	0

2. 创建摇臂（pivot）

在几何建模工具集，选取工具，在参数设置栏设置 Thickness=1，Radius=1。根据状态栏的提示，依次选取 Point_1，Point_2 及 Point_3，Point_1 四点，按右键创建摇臂，如图 8-14 所示。

用鼠标右键选择按钮，在弹出菜单中，选择 part：PART_2，再选择 Rename，如图 8-15 所示；在对话框中输入新名：.Latch.pivot，如图 8-16 所示，单击 OK 按钮。

3. 创建手柄（handle）

在几何建模工具集选取工具，依次选取 Point_3 及 Point_4 创建手柄，如图 8-17 所示。

用鼠标右键选择手柄，在弹出式菜单中选择 part：PART_3，再选择 Rename，在对话框中输入新名：.Latch.handle。

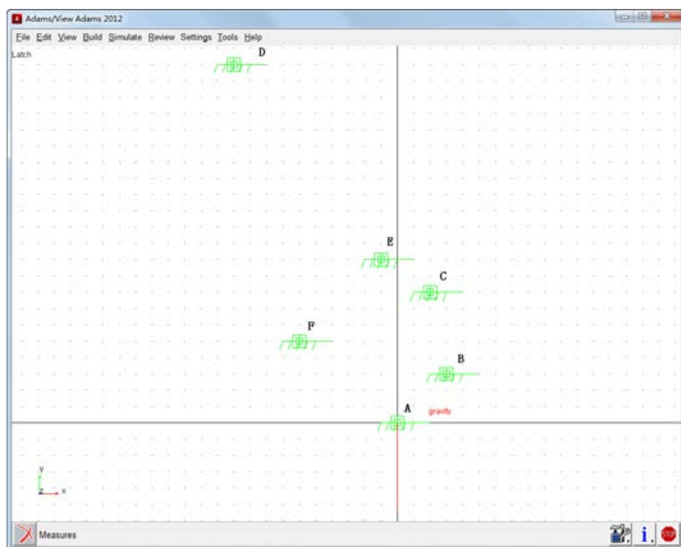


图 8-13　6 个设计点

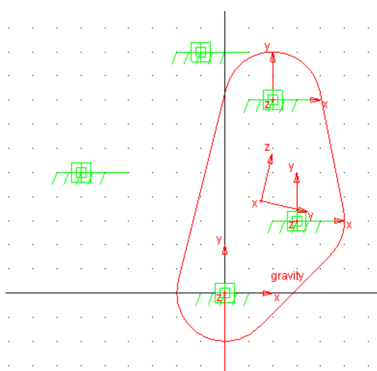


图 8-14　摇臂模型

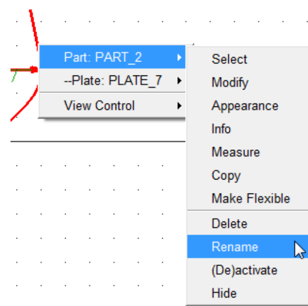


图 8-15　下拉式菜单

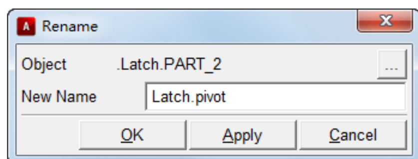


图 8-16　重新命名对话框

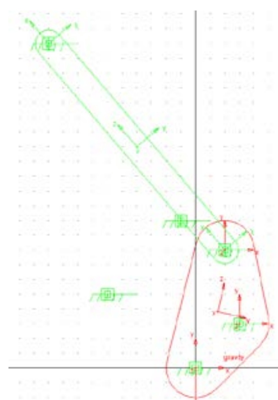


图 8-17　创建手柄后的模型

4．创建锁钩（hook）

在几何建模工具集，选取工具，在 Length 中输入 1，根据表 8-2 给出的参数化

坐标值，依次在屏幕上选取各点，按鼠标右键完成创建滑钩，如图 8-18 所示。

用鼠标右键选择滑钩，将滑钩改名为：.Latch.hook。

表 8-2 滑钩建模坐标值

点坐标	x 坐标	y 坐标	z 坐标
1	5	3	0
2	3	5	0
3	-6	6	0
4	-14	6	0
5	-15	5	0
6	-15	3	0
7	-14	1	0
8	-12	1	0
9	-12	3	0
10	-5	3	0
11	4	2	0

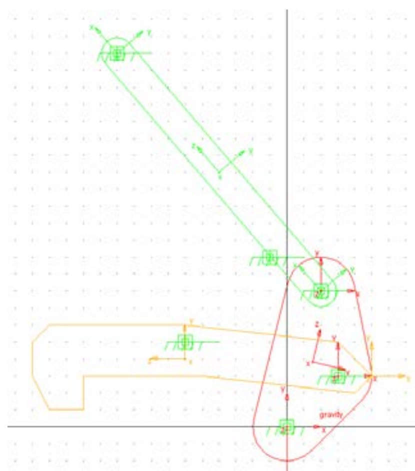


图 8-18　创建锁钩后的模型

用鼠标选择滑钩，可以看到滑钩上出现许多亮点（热点），用光标拖动亮点可以改变滑钩形状。在主工具箱中选择命令，可以放弃最后一步操作。

5．创建滑杆（slider）

在几何建模工具集选取工具，依次选取 Point_5 及 Point_6 创建滑杆，如图 8-19 所示。

用右健选择滑杆，将滑杆改名为：.Latch.slider。

6．创建夹紧固定支架

在几何建模工具集，选取工具，在参数设置区将构建方式选项由 New Part 改为 On Ground，依次选取点（-2，1，0）、（-18，0，0）创建固定支架，如图 8-20 所示。

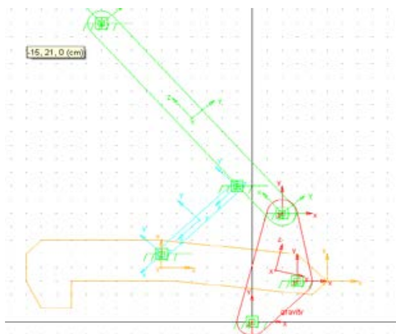


图 8-19　创建滑杆后的模型

用鼠标右键选择固定支架，将固定支架改名为：.Latch.ground.block。

7．添加铰链副

如图 8-20 所示，夹紧机构在 A 点处通过铰链副将摇臂同基础框架连接，在 B 点处通过铰链副将滑钩与摇臂连接，在 C 点处通过铰链副将手柄与摇臂连接，在 D、F 点处通过铰链副将滑杆分别同手柄和滑钩连接。

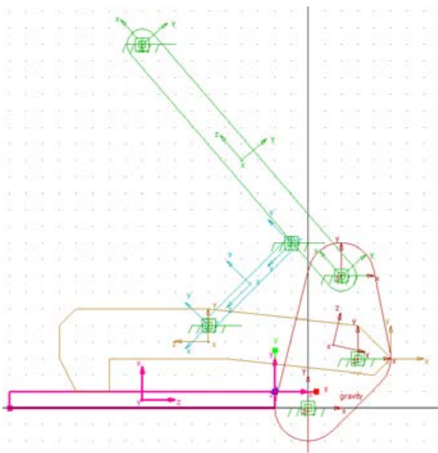


图 8-20　创建固定块的模型

在 A 点处将摇臂同基础框架连接。在主工具箱的连接工具集，选择铰链副，在参数设置栏选择 1 Location，Normal To Grid，选取 Point_1 点。

添加滑钩与摇臂铰链副。在主工具箱的连接工具集，选择铰链副，在参数设置栏，选择 2 Bod-1 Loc，Normal To Grid，依次选择摇臂（pivot）、滑钩（hook）及 Point_2 点，完成设置。

添加手柄与摇臂铰链副，选取铰链副后选择摇臂(pivot)、手柄(handle)及 Point_3。

添加滑杆与手柄铰链副，选取铰链副后选择滑杆（slider）、手柄（handle）及 Point_5。

添加滑杆与滑钩铰链副，选取铰链副后选择滑杆（slider）、滑钩（hook）及 Point_6。

8．添加点 — 面约束副（低副）

在主工具箱，选择动态选择视图工具，局部放大滑钩。

在 Build 菜单选择 Joint，如图 8-21 所示，显示连接对话框，如图 8-22 所示。选择工具，在参数栏设置 2 Bodies-1 Location 及 Pick Geometry Feature。依次选取固定支架（ground.block）、滑钩（hook）、点（-12，1，0），向上拖动鼠标，出现如图 8-23 所示的箭头方向时，按下左键。

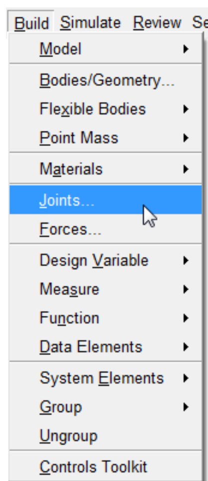


图 8-21　Build 菜单

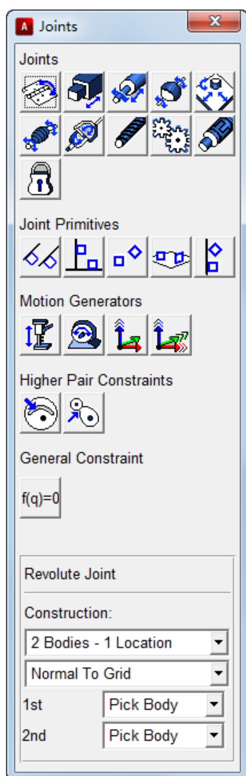


图 8-22　约束库

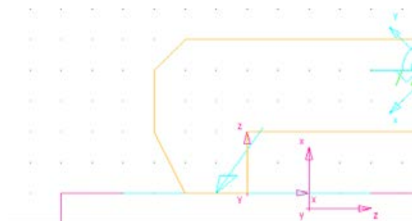


图 8-23　创建低副

在主工具箱，选择工具 恢复视图。

9．创建弹簧

在主工具箱施加力工具集选择拉压弹簧阻尼器工具。在参数栏选择弹簧刚性系数 K，输入 K=800，选择阻尼系数 C，输入 C=0.5。

选取点（-14，1，0）处的滑钩顶点，注意应选取在滑钩的顶点上（hook.Extrusion_9．V16），而不是坐标点上，再选取点（-23，1，0）。

10．创建手柄力

在主工具箱施加力工具集选择单作用力工具，设置 Space Fixed，Pick Feature 及 Constant，选择 Force，输入 80。

依次选取手柄（handle）、手柄末端点（handle.Marker_5）、点（-18，14，0），并且将手柄力设置为 80N。

11．保存模型

完成建模，保存数据库。完成建模后的夹紧夹紧机构模型，如图 8-24 所示。在 File 菜单，选择 Save Database As 命令，如图 8-25 所示，输入文件名：Latch.bin，选择 OK 按钮，保存数据库。

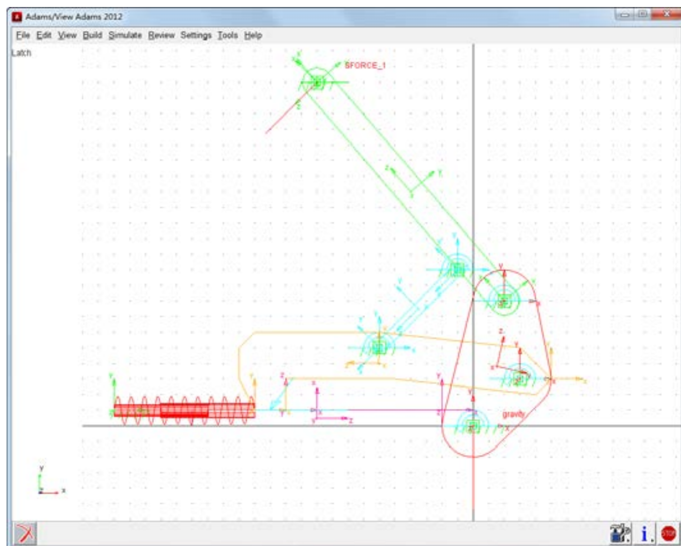


图 8-24　创建的夹紧机构模型

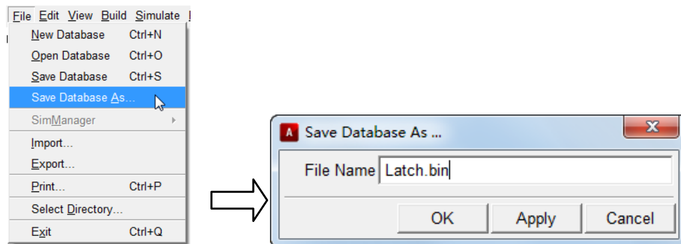


图 8-25　保存模型对话框

12．仿真观看当前模型的运动情况

在主工具箱，选择仿真工具，取 End Time=1.0，Steps=50，开始仿真分析。如果需要，可以选择回放工具，重新观看仿真过程。

8.3.4　测试模型

1．设置弹簧力的测量

在弹簧处按鼠标右键，在弹出式菜单中选择 Spring：Spring_1，再选择 Measure，如图 8-26 所示，显示施加测量对话框。

在弹出式对话框中将 Characteristic 选项设为 Force，如图 8-27 所示。选择 OK 按钮，显示弹簧力测量窗口。

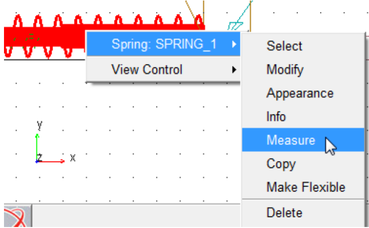


图 8-26　下拉式菜单

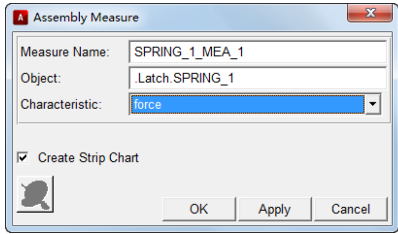


图 8-27　测量对话框

2．角度的测量

在 Build 菜单选择 Measure 项，再选择 Angle，最后选择 New，如图 8-28 所示，显示产生角度测量对话框。

在 Measure Name 栏，将测量名称改为 overcenter_angle。

在 First Marker 栏，按鼠标右健选择 Marker，再选择 Pick。选择在 Point_5 处的任意一个标记（marker）。

在 Middle Marker 栏，按鼠标右键选择 Marker，再选择 Pick。选择在 Point_3 处的任意一个标记（marker）。

在 Last Marker 栏，按鼠标右键选择 Marker，再选择 Pick。选择在 Point_6 处的任意一个标记（marker）。设置完成如图 8-29 所示，选择 OK 按钮，显示角度测量窗口。

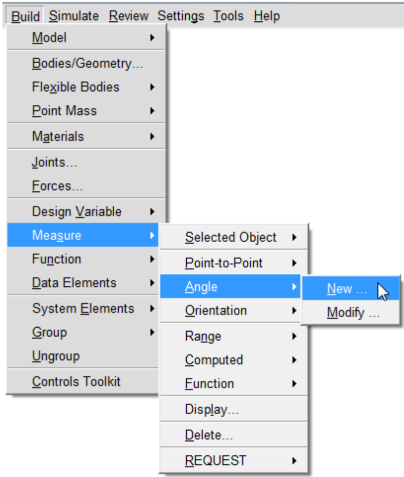


图 8-28　创建角度测量命令

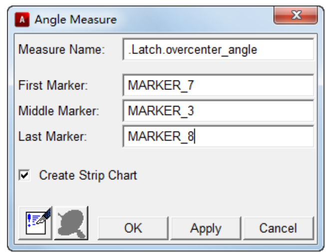


图 8-29　角度测量对话框

3．样机仿真分析

在主工具箱选择仿真工具，取 End Time=0.2，Steps=100。选择按钮 开始仿真分析。仿真时测量窗口可以实时显示结果，如图 8-30、图 8-31 所示。

如果需要，可以选择回放工具回放仿真过程。图 8-30、图 8-31 反映了夹紧系统在

80N 恒力作用下，夹紧力和角度随时间的变化值。

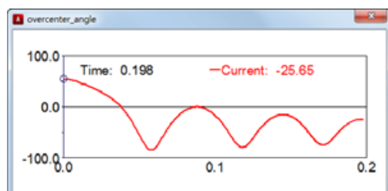


图 8-30　角度测量曲线图

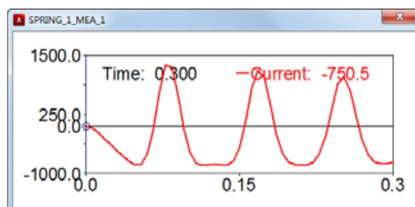


图 8-31　弹簧力测量曲线图

4．创建角度传感器

在 Simulate 菜单选择 Sensor，再选择 New，如图 8-32 所示，显示创建传感器对话框，如图 8-33 所示。

在对话框中设置或选择：Event Definition=Run-time Expression，Expression =.Latch. overcenter_angle，Angular Values=less than or equal，Values=0。其他设置如图 8-33 所示。选择 OK 按钮，完成创建传感器。

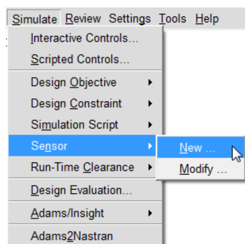


图 8-32　创建传感器命令

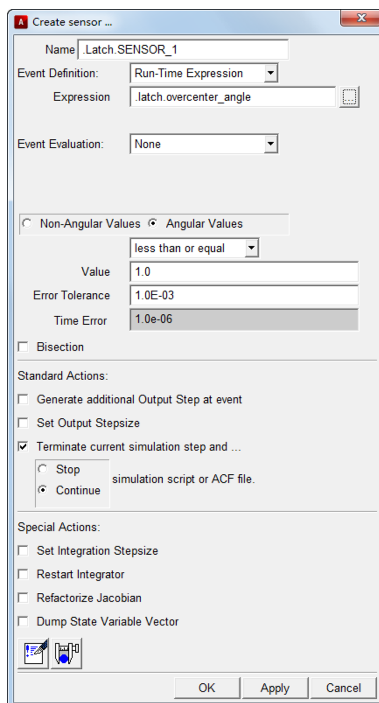


图 8-33　创建传感器对话框

保存当前数据库在 File 菜单。选择 Save Database As 命令，输入文件名：test，选择 OK 按钮，保存数据库。

5．进行样机仿真

在主工具箱选择仿真工具 ，取 End Time=0.2，Steps=100。

选择按钮 ▶，开始仿真分析。仿真时测量窗口显示如图 8-34、图 8-35 所示测量结果。夹紧系统在 80N 恒力作用下，由于传感器的作用，使得手柄到达角度（overcenter_angle）等于 0 时停止仿真分析。图 8-34、图 8-35 反映了在最后一次仿真分析中，夹紧力（Clamping force）及角度（Overcenter_angle）随时间的变化曲线。

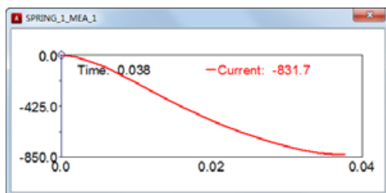


图 8-34　弹簧力随时间的变化曲线

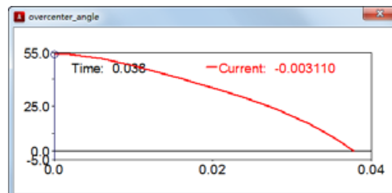


图 8-35　角度随时间的变化曲线

8.3.5　验证模型

1．导入实验数据

在本例中直接利用 ADAMS 给出的一组实验数据：

（1）在 File 菜单，选择 Import，显示输入对话框。

（2）在 File type 栏，选择 Test Date，选择 Create Measure 选项。

（3）在 File to Read 栏，按鼠标右键，在弹出式菜单中选择 Browse，选择 MSC.Software 的安装目录：aview/examples/latch/test_dat.csv。

（4）在 Model Name 文本框输入.Latch，如图 8-36 所示。选择 OK，读入实验数据。

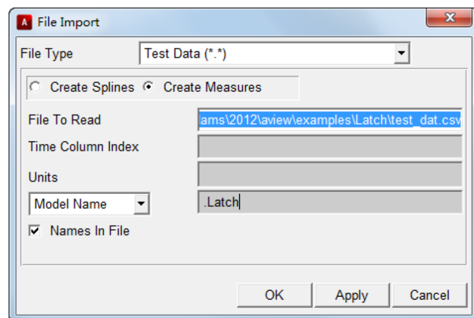


图 8-36　导入实验数据对话框

2．绘制实验数据曲线图

（1）在 Review 菜单，选择 Postprocessing…命令进入后处理程序。

（2）在窗口左上方选择 Plotting；在控制区，选择 Measures，在 Simulation 列表中选择 test_dat；在 Independent Axis 选项中选择 Data，在对话框中选 MEA_1，选择 OK。

（3）在 Measure 列表中选择 MEA_2；选择 Add Curves 按钮，绘制实验数据曲线图。

3．修改实验数据曲线图

（1）在窗口左侧的对象结构关系栏，选择 Page_1 下属的 plot_1 项；在参数特性编辑区设置标题 Title=Latch Force vs. Handle Angle。

（2）选择 haxis 项，在参数特性编辑区设置 y 轴标题 Label=Degrees。

（3）选择 vaxis 项，在参数特性编辑区设置 x 轴标题 Label=Newtons。

4．仿真数据曲线图

（1）在控制面板区，在 Simulation 列表中选择 last_run；在 Independent Axis 选项中选择 Data，在显示的对话框选择 overcenter_angle。

（2）在 Measure 列表中选择 Spring_1_MEA_1;选择 Add Curves 按钮，绘制仿真数据曲线图，如图 8-37 所示，实验曲线与仿真曲线能较好地吻合。

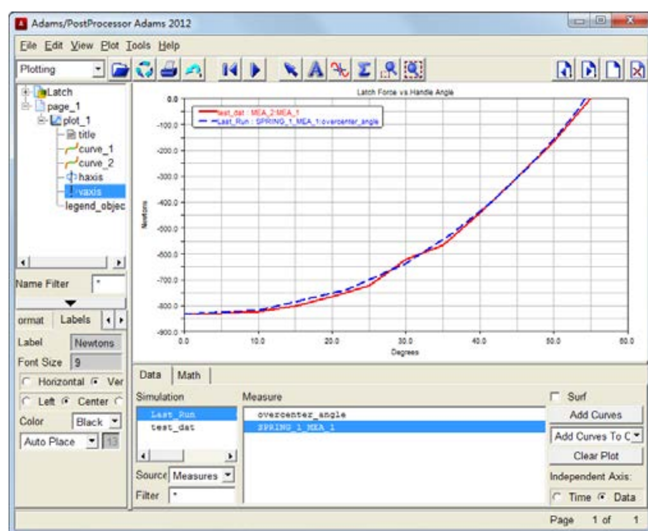


图 8-37　实验和仿真数据曲线图

5．保存数据文件

按 F8 键退出 Postprocessor 界面，然后在 File 菜单选择 Save Database As，输入文件名：va-lidate.bin。

8.4 优化设计实例——夹紧机构

本节通过对夹紧机构的参数化模型具体说明设计研究、试验设计和优化设计这 3 种参数化分析方法。

8.4.1　模型参数化

1．建立设计变量

用鼠标右键点击点 POINT_1（0，0，0），在弹出式菜单中选择 Point：POINT_1，然后选择 Modify，显示表格编辑器窗口。

选择 POINT_1 的 Loc_X 单元格，在表格编辑器输入栏显示弹出式菜单，然后依次选择：Parameterize，Create Design Variable，Real，产生设计变量.Latch.DV_1。

重复上述步骤，依次分别设定 POINT_1 的 Loc_Y，POINT_2 的 Loc_X 和 Loc_Y，POINT_3 的 Loc_X 和 Loc_Y，POINT_5 的 Loc_X 和 Loc_Y，POINT_6 的 Loc_X 和 Loc_Y，如图 8-38 所示，选择 Apply。

Table Editor for Points in .Latch

	Loc_X	Loc_Y	Loc_Z
POINT_1	(DV_1)	(DV_2)	0.0
POINT_2	(DV_3)	(DV_4)	0.0
POINT_3	(DV_5)	(DV_6)	0.0
POINT_4	-10.0	22.0	0.0
POINT_5	(DV_7)	(DV_8)	0.0
POINT_6	(DV_9)	(DV_10)	0.0

图 8-38　设置设计变量

2．观察设计变量

在表格编辑器中选择 Variable，选择 Filters，在弹出的对话框中选 Delta_Type 项，选择 OK 按钮关闭对话框。目前数据库中的所有设计变量如图 8-39 所示，完成后关闭表格编辑器。

3．储存数据库

在 File 菜单选择 Save Database As，输入文件名：Refine。

Table Editor for Real Variables in .Latch

	Real_Value	Range	Use_Range	Delta_Type
DV_1	0.0	-1.0, 1.0	yes	absolute
DV_2	0.0	-1.0, 1.0	yes	absolute
DV_3	3.0	-10.0, 10.0	yes	percent_relative
DV_4	3.0	-10.0, 10.0	yes	percent_relative
DV_5	2.0	-10.0, 10.0	yes	percent_relative
DV_6	8.0	-10.0, 10.0	yes	percent_relative
DV_7	-1.0	-10.0, 10.0	yes	percent_relative
DV_8	10.0	-10.0, 10.0	yes	percent_relative
DV_9	-6.0	-10.0, 10.0	yes	percent_relative
DV_10	5.0	-10.0, 10.0	yes	percent_relative
Latch.SPRING_1.stiffness_coefficient	800.0	(NONE), (NONE)	yes	absolute
Latch.SPRING_1.damping_coefficient	0.5	(NONE), (NONE)	yes	absolute
Latch.SPRING_1.free_length	1.0	(NONE), (NONE)	yes	absolute
Latch.SPRING_1.preload	0.0	(NONE), (NONE)	yes	absolute

图 8-39　编辑设计变量

8.4.2　设计研究

1．运行设计研究

（1）在 Simulate 菜单选择 Design Evaluation，如图 8-40 所示，显示设计研究、试验设计和优化设计对话框。

（2）选择和设置：选择 Measure，Minimum of，Minimum of = .Latch.SPRING _1_MEA_1，

Design Study = ON，Design Variable=.Latch.DV_1，Default levels = 7，如图 8-41 所示。

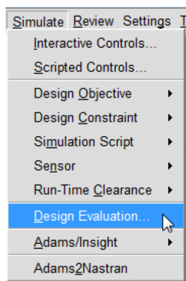


图 8-40　进入参数化分析命令

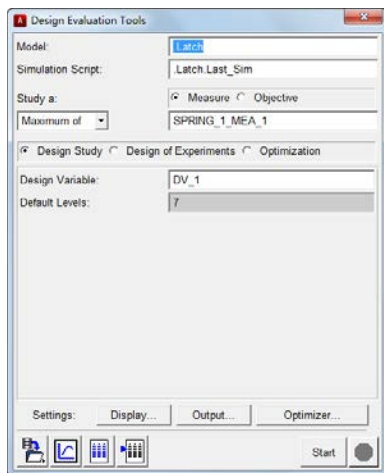


图 8-41　参数化分析对话框

（3）选择 Display…，显示仿真设置对话框，设置 Chart objective = Yes，Chart variables = Yes，Save curves = Yes，Show report = Yes，如图 8-42 所示。选择 Close 按钮关闭仿真设置对话框。

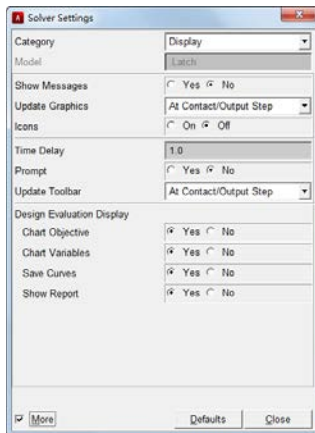


图 8-42　仿真设置对话框

（4）调整夹紧机构在 ADAMS/View 窗口中的视图尺寸，获得较佳的观看效果，然后选择 Start，开始运行设计研究。

在设置设计研究目标函数时，选择最小值 Minimum of 选项，是因为在本模型中计算获得的弹簧力 SPRING_1_MEA_1 为负值，最小值实际上代表弹簧力的最大绝对值。

设计研究结果如图 8-43～图 8-45 所示。

根据信息窗口提供的设计研究报告，可以获得当 POINT_1 的 x 坐标（DV_1）取不同

值时夹紧力的敏感度。DV_1 取初始值时的敏感度为-88，而 DV_1 取-1 时可以获得最佳的夹紧效果。

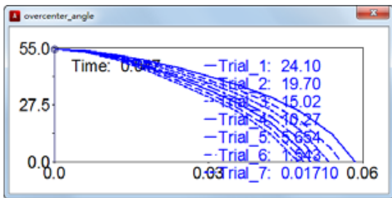


图 8-43　手柄角度随时间的变化曲线

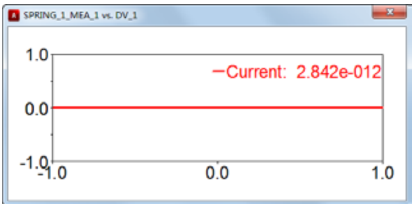


图 8-44　弹簧力随时间的变化曲线

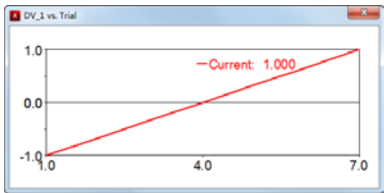


图 8-45　设计变量 DV_1 的取值

2. 设计研究结果分析

采用相同的方法，可以对所有的设计变量分别进行设计研究分析，得到其他设计点的设计研究结果，如表 8-3 所示。

表 8-3 设计研究结果汇总表

设计变量	设计点	坐标方向	初始值	在初始值时的敏感度 /N•cm^{-1}	优化显著性
DV_1	POINT_1	X	0	-88	1
DV_2	POINT_1	Y	0	446	0
DV_3	POINT_2	X	3	140	2.7
DV_4	POINT_2	Y	3	-425	3.2
DV_5	POINT_3	X	2	-16	2.2
DV_6	POINT_3	Y	8	270	7.73
DV_7	POINT_5	X	-1	34	-1.1
DV_8	POINT_5	Y	10	-277	10.3
DV_9	POINT_6	X	-6	-56	-5.4
DV_10	POINT_6	Y	3	98	4.5

根据表 8-3 可以了解哪些设计变量对夹紧力有较大的影响，如从表 8-3 可知 DV_2，DV_4，DV_6，DV_8 的敏感度最大，这一结论为进一步优化设计奠定了基础。由此可知，可以着重对这 3 个位置进行调整，以获得进一步的优化设计结果。

8.4.3　优化设计与分析

1．修改设计变量

（1）在 Build 菜单选择 Design Variable，再选择 Modify，在显示的数据库浏览器中双击 DV_2，显示设计变量修改对话框。

（2）在 Value Range by 栏选择 Absolute Min and Max Value，设置 Min.Value = -1，Max.Value=1，如图 8-46 所示。选择 Apply 确认修改值。

（3）用鼠标右键在 Name 栏显示弹出式菜单，选择 Variable，再选择 Browse 命令，显示数据库浏览器。双击 DV_4，设置 Min.Value=1，Max.Value=6。选择 Apply。

（4）重复以上的操作，设置 DV_6，DV_8 的取值范围 Min.Value=6.5，Max.Value=10，Min.Value=9，Max.Value=11。

（5）选择 OK 按钮，关闭修改设计变量窗口。

2．显示测量图

（1）在 Build 菜单选择 Measure，再选择 Display，在弹出的数据库浏览器中，双击 SPRING_MEA_1，显示弹簧力测量图。

（2）重复以上的操作，在弹出的数据库浏览器中双击 overcenter_angle，显示角度测量图。

3．运行优化分析

（1）在 Simulate 菜单选择 Design Evaluation…命令。显示设计研究、试验设计和优化设计对话框。

（2）选择和重置：Measure，Minimum of，Optimization，并且 Minimum of =.Latch. SPRING_1 _MEA_1。

（3）在 Design Variable 栏，用鼠标右键显示弹出式菜单，选择 Variable，再选择 Browse 命令，显示数据库浏览器。用鼠标单击.Latch.DV_2，重复以上过程，再分别输入.Latch.DV_4，.Latch.DV_6，.Latch.DV_8。

（4）选择 Auto.Save 项（默认值）。

（5）在优化目标 Goal 栏，选择 Minimize Des. Meas./Objective 项，通过寻找最小弹簧力 SPRING_1_MEA_1（即弹簧力的最大绝对值），获得最佳的夹紧机构，如图 8-47 所示。

(6)选择 Display 按钮,显示仿真设置对话框,如图 8-48 所示,设置 chart objective = ON，Chart design variables = ON，Save strip chart curves = ON，Show tabular report = ON，Show tabular report = ON。选择 OK 按钮关闭仿真设置对话框。

（7）选择 Output 按钮，显示输出设置对话框，如图 8-49 所示。设置 Save Files = Yes。

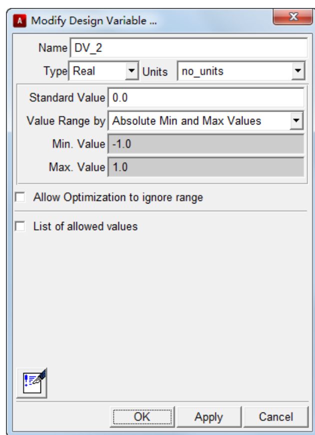


图 8-46　设计变量修改对话框

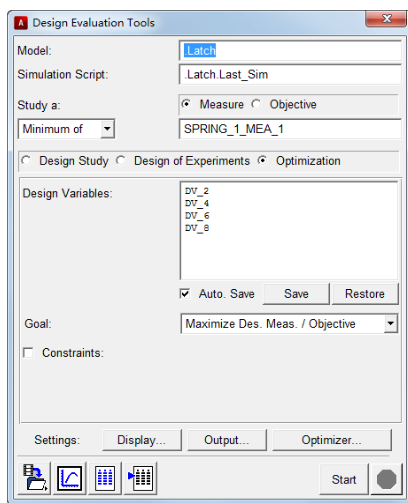


图 8-47　优化设计对话框

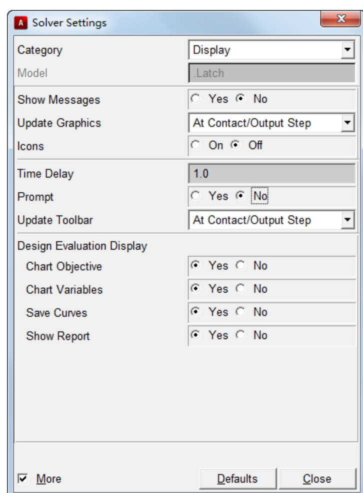


图 8-48　显示设计对话框

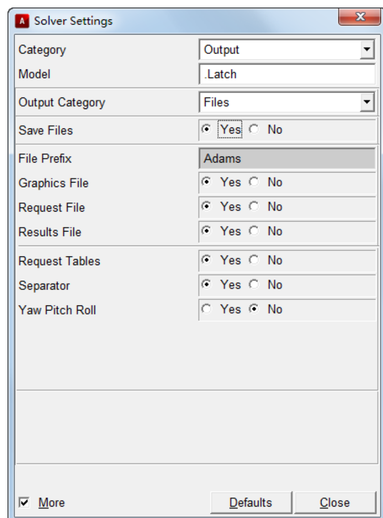


图 8-49　输出设置对话框

（8）按 Start 按钮，开始优化计算。

（9）选择对话框底部的表格报告工具，显示表格化的分析报告。

4．优化结果分析

图 8-50 和图 8-51 表示各次迭代运算过程中，夹紧力及手柄角度的变化曲线，图 8-52 反映各次迭代运算过程所对应的最大夹紧力值。同时在信息窗口中给出了优化分析报告，其中主要结论如表 8-4 所示。

从表 8-4 和曲线图中可以看出，经过 9 次迭代运算，ADAMS 找到一个最优点，使最大夹紧力由 846N 提高到 971N。并自动生成新的样机模型。

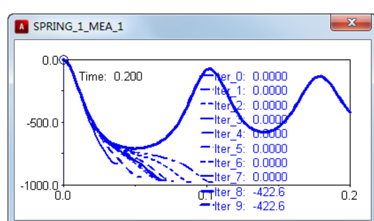


图 8-50　夹紧力的变化曲线

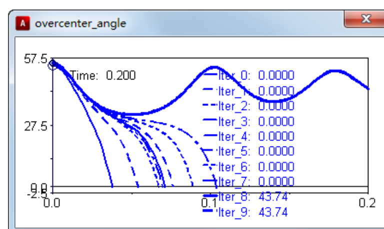


图 8-51　手柄角度的变化曲线

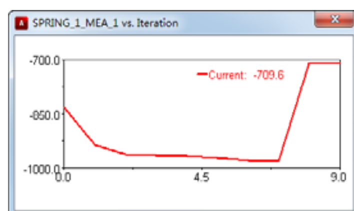


图 8-52　各次迭代过程的最大夹紧力

表 8-4 优化分析结果

	SPRING_1_MEA_1	DV_2	DV_4	DV_6	DV_8
初始值	-831.56.	0	3	8	10
优化值	-980.05	-0.065971	3.2143	7.9747	10.049

第 9 章

ADAMS/Insight 试验优化设计

ADAMS/insight 是 MSC 公司的试验设计（Design of Experiments，简称 DOE）软件。通过 ADAMS/Insight 用户可以设计复杂的试验来评价机械系统的性能，它提供了一系列的统计工具以帮助用户更好地分析试验设计的结果。利用 ADAMS/Insight，用户可以进行单目标或多目标优化，自变量可以是连续的，也可以是离散的。

学习要点

- 运行 ADAMS/Insight
- 参数化分析与回归分析
- 蒙特卡罗方法应用

9.1　运行 ADAMS/Insight

ADAMS/Insight 可以单独运行，此时的设计因素（factor）和响应（response）需要用户手动创建或从外部导入，它的强大功能在于可以和 ADAMS 的其他产品一起工作。

下面通过实例说明 ADAMS/Insight 的工作过程。

（1）启动 ADAMS/View。

（2）把 ADAMS 2012 软件安装目录下的 ainsight\examples\ain_tut_101_aview.cmd 复制到工作目录下。为了方便操作，把该文件附在光盘 yuanwenjian\ch_9\example 文件夹下，文件名为 ain_tut_101_aview.cmd。

（3）导入 ain_tut_101_aview.cmd 文件，如图 9-1 所示，导入的是一个双横臂独立前悬架模型，通过 ADAMS/Insight 将研究如何通过调节硬点的位置，分析在车轮上下跳动时其对前束的影响。

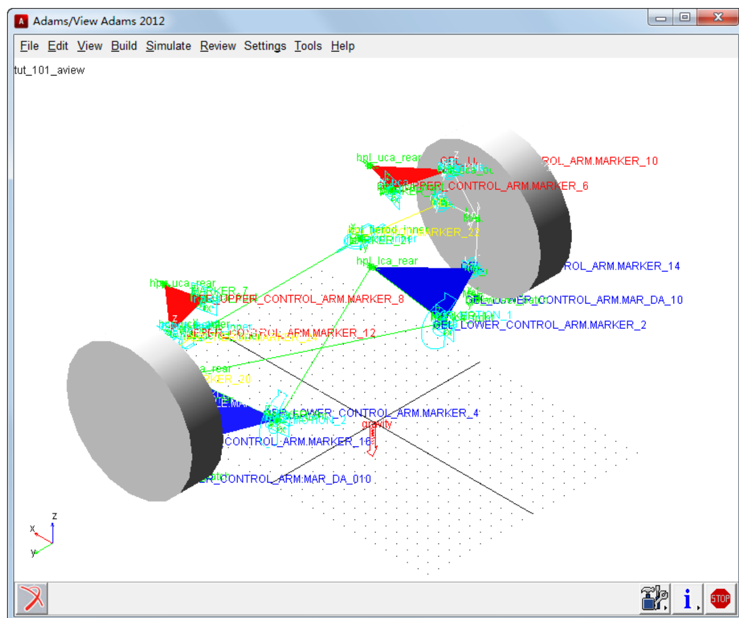


图 9-1　双横臂悬架模型

（4）在“Simulation Control”窗口中，单击运行按钮进行仿真计算。

（5）启动 ADAMS/Insight。

（6）在 ADAMS/View 环境下，单击菜单栏中的“Simulate”→“ADAMS/Insight”→“Export”命令，打开图 9-2 右图所示的“ADAMS/Insight Export”对话框。

（7）在“Experiment”文本框中输入试验的名称，也可以使用默认值，在“Model”文本框中输入模型的名称或使用默认值，也可以右击，在弹出的右键菜单中单击“Model”→“Browse”命令选择模型。

（8）在“Simulation Script”文本框中采用默认值，或右击，在弹出的右键菜单中

单击“Simulation_Script”→“Browse”命令选择模型。

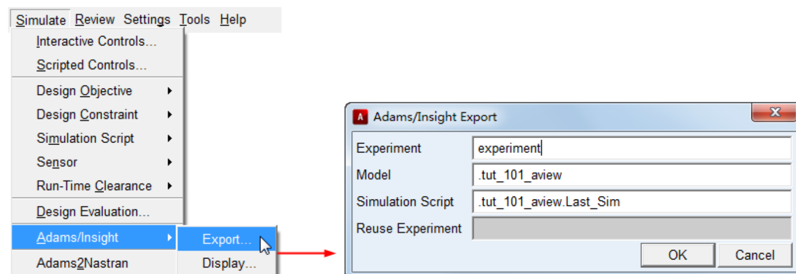


图 9-2　打开“ADAMS/Insight Export”对话框

（9）单击“OK”按钮，ADAMS/View 就会启动 ADAMS/Insight，如图 9-3 所示。在 Windows 操作系统下，ADAMS/View 会打开一个 DOS 窗口，当用户关闭 ADAMS/Insight 后，该窗口会自动关闭，用户不要手动关闭 DOS 窗口。

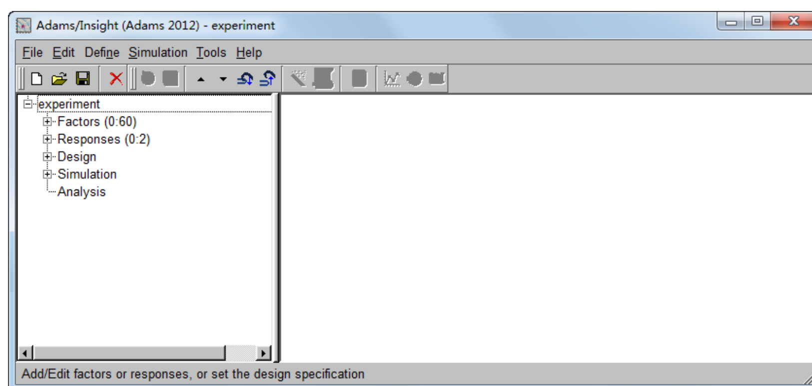


图 9-3　ADAMS/Insight 界面

一个完整的试验设计由 5 个部分组成：

- 确定试验目的。例如，用户想知道哪个参数的变化对系统的性能影响最大。
- 选择一组要研究的参数或因素（factors），并且构造恰当的方式来近似地描述系统的性能，这种描述称为响应（response）。
- 确定所选因素的范围，也称为水平（levels）。安排一组试验（runs or trials），在这些试验中因素会变化。
- 执行这些试验，记录下每次试验后系统的性能。
- 对整个试验过程中系统性能的变化进行分析，确定影响最大的因素。

下面结合 ADAMS/Insight 对上述过程的实施进行具体介绍。

（10）在界面的树形菜单“Treeview”中，单击“Factors”前面的“+”，将“Factors”展开为“Inclusions”和“Candidates”。

（11）连续扩展 Candidates/tut_101_aview/ground/hpl_tierod_outer。在“hpl_tierod_outer”下面会看到一组设计变量，这些设计变量可以作为设计矩阵里的因素。

（12）连续选择“hpl_tierod_outer.x”、“hpl_tierod_outer.y”和“hpl_tierod_outer.z”，然后单击工具栏中的按钮，此时的树形图如图 9-4 所示。

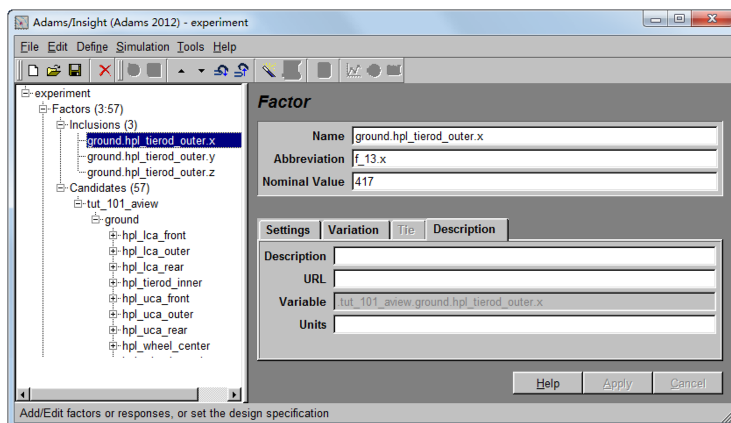


图 9-4　ADAMS/Insight 的树形图

（13）对选择因素的特性进行修改。从“Inclusions”列表中选择“hpl_tierod_outer.x”因素，在“Factor”栏中将“Abbreviation”设置为“tierod_outer.x”，在“Description”标签中将“Units”设置为“mm”，然后设置“Settings”标签，修改因素的特性如图 9-5 所示。设置完毕单击“Apply”按钮，即可保存修改。

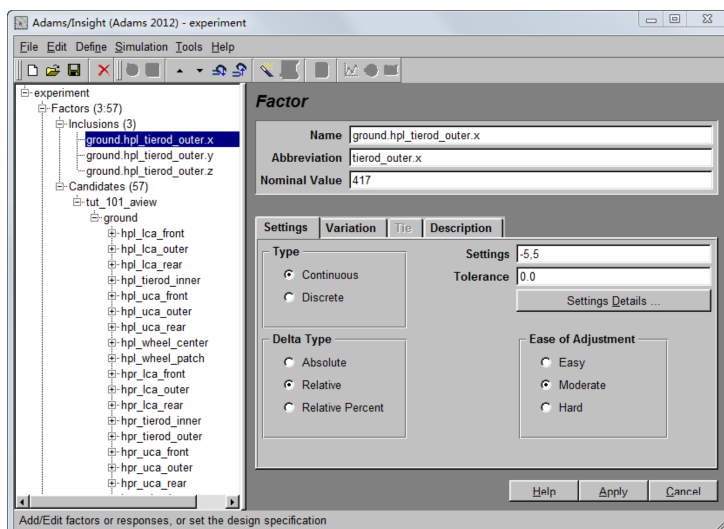


图 9-5　设计因素的属性

（14）对 hpl_tierod_outer.y 和 hpl_tierod_outer.z 也做与 hpl_tierod_outer.x 相似的修改。

步骤（10）～（14）为 ADAMS/Insight 中给定设计因素的过程。

（15）在界面的树形菜单中，单击“Responses”前面的“+”，将“Responses”展开

为“Inclusions”和“Candidates”。

（16）连续扩展 Candidates/ tut_101_aview 会看到一组响应，这些响应可以作为设计矩阵里的因素。

（17）选择“toe_left_REQ”和“toe_right_REQ”，把它们从“Candidates”列表中移到“Inclusion”列表中。

（18）从“Inclusions”列表中选择响应“toe_left_REQ”，按如图 9-6 所示，重新设定响应的相关属性。

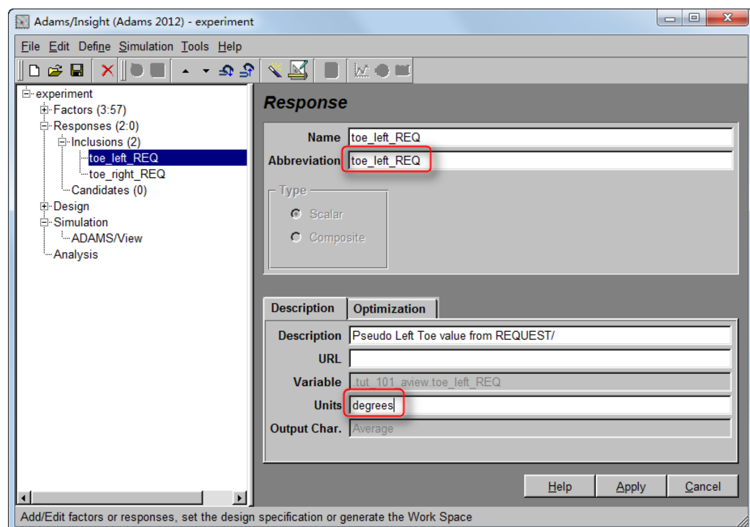


图 9-6 修改响应的属性

当 ADAMS/Insight 和其他的 MSC 产品一起工作时，Output characteristics 下所有的特性都是不可修改的;当 ADAMS/Insight 以 Standalone 模式运行时，这些选项都可以修改。

（19）设置完毕单击“Apply”按钮，即可保存修改。利用同样的方法修改响应 toe_right_REQ 的属性。

步骤（15）～（19）为 ADAMS/Insight 中给定目标的过程。

（20）单击工具栏中的 （设计规范）按钮，弹出图 9-7 所示的窗口，“Design Specification”中的内容是 ADAMS/Insight 的核心部分，本章后面将对该部分内容做详细介绍。

（21）前面选定了 3 个参数，并为每个参数指定了范围，这就构成了设计空间（Design Space）。只需单击菜单栏中的“Define”→“Experiment Design”→“Create Design Space”命令，再单击工具栏中的 按钮，即可得到 ADAMS/View 中的工作矩阵，如图 9-8 所示。ADAMS/View 会按照矩阵中的参数进行 8 次仿真。

（22）在确定了 Work Space 中的信息之后，单击菜单栏中的“Simulation”→“Build-Run-Load”→“All”命令，即可调用 ADAMS/View 进行仿真计算。在仿真结束后，会出现一个“Information”对话框，单击“OK”按钮，得到仿真结果如图 9-9 所示。

步骤（20）～（22）为 ADAMS/Insight 中给定一组试验的过程。

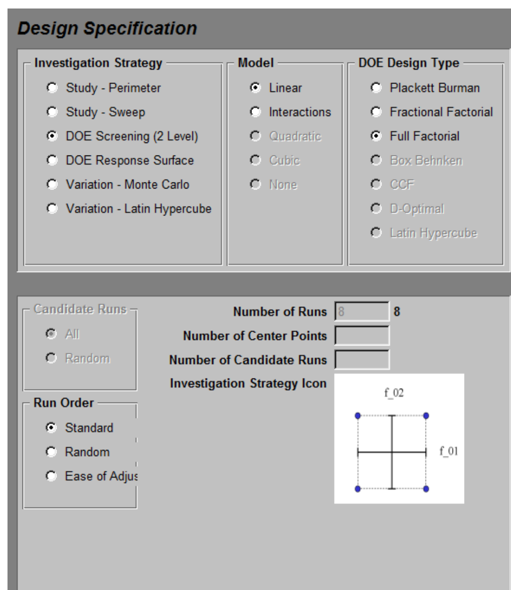


图 9-7　设计因素的属性

Adams/Insight (Adams 2012) - experiment

File Edit Define Simulation Tools Help

experiment / Factors (3:57) / Responses (2:0) / Design(D:W) / Specification / Inclusions / Design Space / Work Space (S-8) / Work Space Review / Simulation / ADAMS/View / Analysis

Work Space

	Trial	tierod_x	tierod_z	tierod_y	toe_left_REQ	toe_right_REQ
1	Trial 1	412	325	-755		
2	Trial 2	412	325	-745		
3	Trial 3	412	335	-755		
4	Trial 4	412	335	-745		
5	Trial 5	422	325	-755		
6	Trial 6	422	325	-745		
7	Trial 7	422	335	-755		
8	Trial 8	422	335	-745		

Work Space consists of (8) trials and (5) columns

图 9-8　工作矩阵

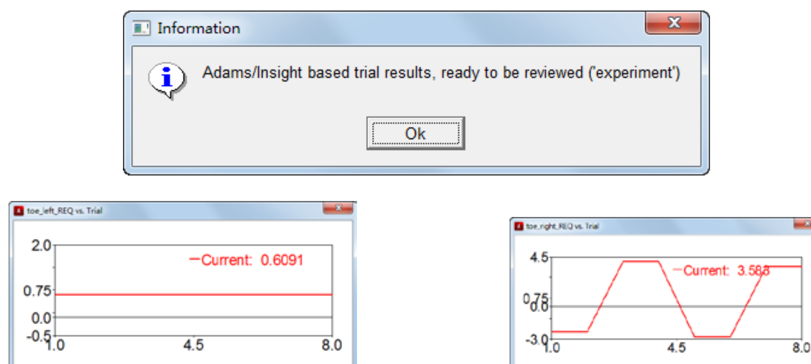


图 9-9　调用 ADAMS/View 进行仿真计算

9.2 参数化分析与回归分析

9.2.1 参数化分析

在上面的例子中，设计因素是已经生成好的。读者在使用 ADAMS/Insight 时，基本问题是如何把自己感兴趣的设计参数定义为设计因素，以及如何把感兴趣的问题定义为响应，也就是所谓的模型参数化问题。在生成设计因素进行 DOE 时，需要注意以下几个问题。

- 进行 DOE 所基于的模型是一个稳健（Robust）的模型，所谓稳健是指模型在整个设计空间（Design Space）内都有确定性的解。这就需要满足两个条件，一是所有方案在物理上都是可行的；二是 ADAMS/Solver 在求解时不会发散。
- 当模型中的变量在一定范围内变化时，好的模型都应该是稳健的，用户需要对这个范围的情况有大概了解。
- DOE 方法会在工作点附近对模型参数进行调整，用户需要保证工作点在稳健的设计空间之内。

在 ADAMS/View 中有以下两类设计参数可以定义为设计因素。

- 结构点（Construction point）：结构点在 ADAMS 中默认为是参数化的，当它们改变时，模型会自动随之更新。
- 设计变量（Design variables）：在 ADAMS 中是利用设计变量来参数化模型的，即它一旦改变，与之相关联的模型特征都会自动更新。

在 ADAMS/View 中有 5 以下类参数可以定义为响应:

- 测量特性（Measure characteristics）。
- 请求特性（Request characteristics）。
- 结果特性（Result set characteristics）。
- ADAMS/View 的函数（Run-time）。
- ADAMS/View 的函数（Design-time）和变量。

下面通过实例深入了解，具体操作步骤如下:

（1）启动 ADAMS/View。

（2）导入模型“ain_tut_101_aview.cmd”，它是一个双横臂独立前悬架模型。

（3）进行一个 1.0s、50 步的仿真（End time“1.0”，Steps“50”）。

（4）改变悬架几何直接影响车轮上下跳动时，前轮定位参数的变化。

（5）进行一个 2.0s、100 步的仿真，按<F8>键进入后处理模式，利用 ADAMS/Post Processor 考察计算结果，用户定义的 Request—TCC（Pseduo toe caster camber）与 X 分量—U2 的曲线图，如图 9-10 所示。

（6）在 ADAMS 界面中，单击菜单栏中的“Tools”→“Table Editor”命令，弹出图 9-11 所示的对话框，在底部点选“Points”单选钮。

（7）把“hpl_tierod_outer”的横坐标由“417”改为“422”。

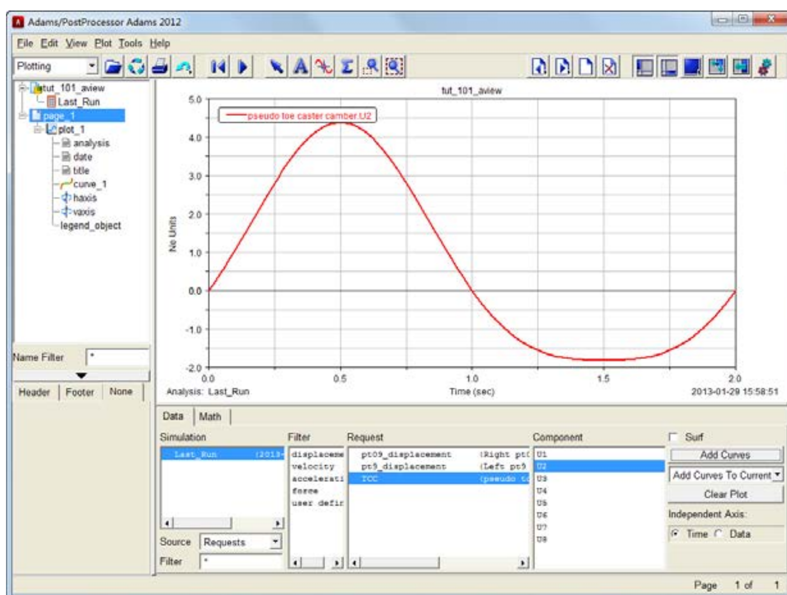


图 9-10　利用 ADAMS/Post Processor 考察计算结果

Table Editor for Points in .tut_101_aview

417.0

	Loc_X	Loc_Y	Loc_Z
hpl_lca_front	67.0	-400.0	180.0
hpl_lca_rear	467.0	-450.0	185.0
hpl_lca_outer	267.0	-750.0	130.0
hpr_lca_front	67.0	400.0	180.0
hpr_lca_rear	467.0	450.0	185.0
hpr_lca_outer	267.0	750.0	130.0
hpl_uca_front	367.0	-450.0	555.0
hpl_uca_rear	517.0	-490.0	560.0
hpl_uca_outer	307.0	-675.0	555.0
hpr_uca_rear	517.0	490.0	560.0
hpr_uca_outer	307.0	675.0	555.0
hpr_uca_front	367.0	450.0	555.0
hpl_tierod_outer	422	-750.0	330.0
hpl_tierod_inner	467.0	-400.0	330.0
hpr_tierod_outer	417.0	750.0	330.0
hpr_tierod_inner	467.0	400.0	330.0
hpl_wheel_center	267.0	-760.0	330.0

Parts　Markers　Points　Joints　Forces　Motions　Variables　Create　Filters...　Sorting...　Write　Reload

图 9-11　模型中的硬点

（8）运行一个 2.0s、100 步的仿真，并把结果与前一次的仿真结果进行比较，如图 9-12 所示。

通过这个例子，用户可以感觉在没有 Insight 的情况下，只能手动改变参数，手动进行结果比较，当设计方案多了以后，这个过程是非常耗时的。下面的过程将说明在没有 Insight 的情况下工程师是如何进行 DOE 的。用户可以通过该过程了解模型在给定设计空间内的性能，从而为下一步的 DOE 确定一个好的基本模型（Baseline Model）。进行该过程需要 ADAMS/Solver 的数据文件，即.adm 文件。用户在文本编辑器中手动编辑模型参数，并把它提交给 ADAMS/Solver 进行分析。

（9）把“hpl_tierod_outer”的横坐标由“422”改回到“417”。

（10）导出.adm 文件。单击菜单栏中的“File”→“Export”命令，弹出“File Export”

对话框，如图 9-13 所示，在“File Type”下拉列表中选择“ADAMS/Solver DataSet”，其他选项接受系统默认值，然后单击“OK”按钮。

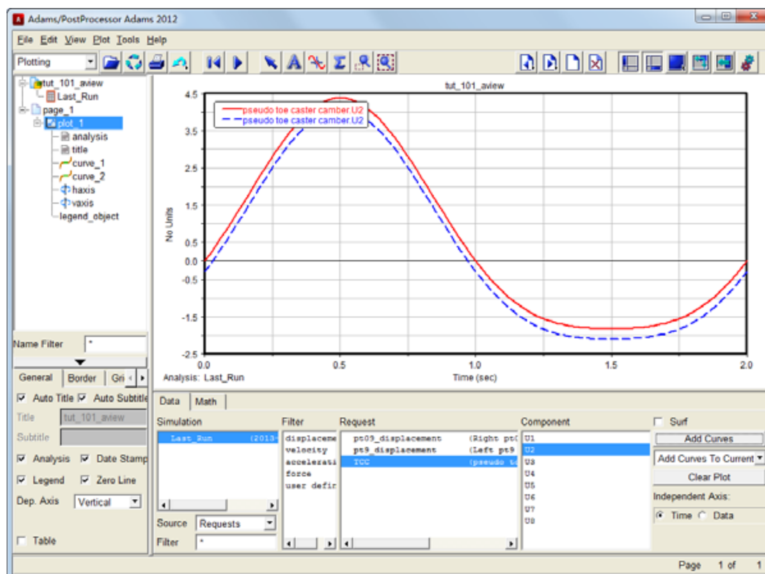


图 9-12　修改前、后结果的比较

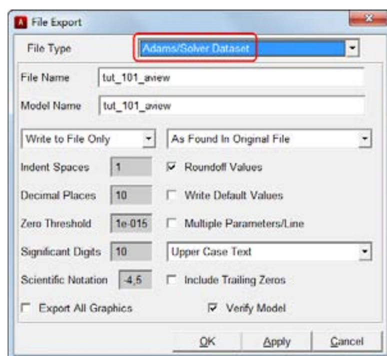


图 9-13　导出.adm 文件

（11）把.adm 文件提交给 ADAMS/Solver。首先创建一个 Solver 的命令文件“run_default.acf”，内容如下。

```
model_1.adm
default_results
simulate/kinematic, end=2, steps=100
stop
```

该命令文件的作用是加载模型 model_1.adm，进行 2.0s、100 步的仿真，保存结果，文件的前缀为“default_results”。

（12）进行仿真。双击“run_default.acf”文件，生成相应的结果文件“.aut，.gra，.msg”和“.req”。

（13）用文本编辑器打开“.adm”文件，手动改变模型的几何形状，并再次进行仿真。在 ADAMS/View 下用户可以直接改变 hpl_tierod_outer 的位置，而在.adm 文件中是通过改变定义 hpl_tierod_outer 的点的位置来实现的。在本例中用户需要手动改变“MARKER/17”和“MARKER/18”的 *x* 分量从“417”到“418”，并保存修改后的文件为“model_11”。再分别把 *x* 分量从“417”改为“419”、“420”和“421”，并相应保存为“model_12”、“model_13”和“model_4”。采用步骤（11）、（12）中的方法，分别把上述.adm 文件提交给 Solver 进行仿真，得到 4 组结果，在后处理模块中导入这些结果，如图 9-14 所示。

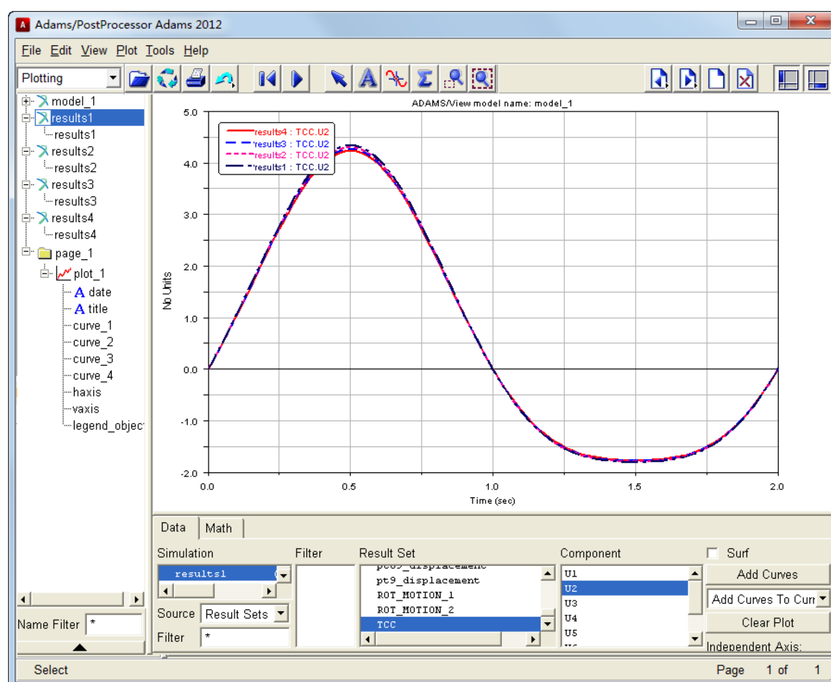


图 9-14　4 组结果的比较

（14）一种更专业的方式是用.acf 文件来提交 4 个仿真，文件内容如下。

```
model_11
results1
simulate/kinematic, end=2, steps=100
file/model=model_12, output=results2
simulate/kinematic, end=2, steps=100
file/model=model_13, output=results3
simulate/kinematic, end=2, steps=100
file/model=model_14, output=results4
simulate/kinematic, end=2, steps=100
stop
```

进一步的 DOE 应当是把分析结果导入专业的统计分析软件，进行仿真结果的分析和处理。以上过程是非常有用的，尤其是在调用复杂的模型时每一个 ADAMS 工程师都应当

掌握，同时也说明了手动进行参数化研究的过程是相当烦琐的。

9.2.2 参数化过程

1．扫描研究

扫描研究是 ADAMS/Insight 提供的工具，利用它可以在 DOE 的开始阶段，通过对设计因素的线性扫描来理解设计变量对模型的影响，从而合理地确定因素的边界，具体操作过程如下：

（1）启动 ADAMS/View，导入“ain_tut_101_aview.cmd”模型。

（2）导出模型到 ADAMS/Insight 中，进行设置，如图 9-15 所示。

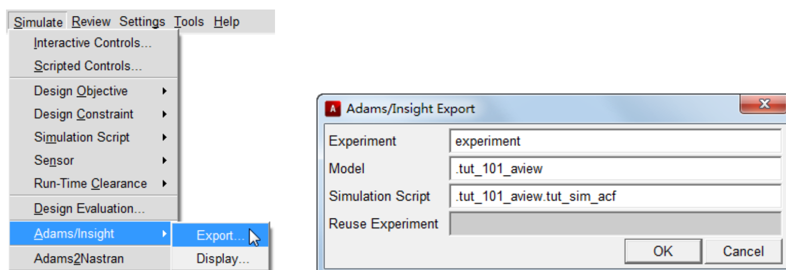


图 9-15　导出模型到 ADAMS/Insight 中

（3）设置分析因素 hpl_tierod_outer.x，如图 9-16 所示，然后单击工具栏中的按钮，将“hpl_tierod_outer.x”上移到“Inclusions”树状列表中。

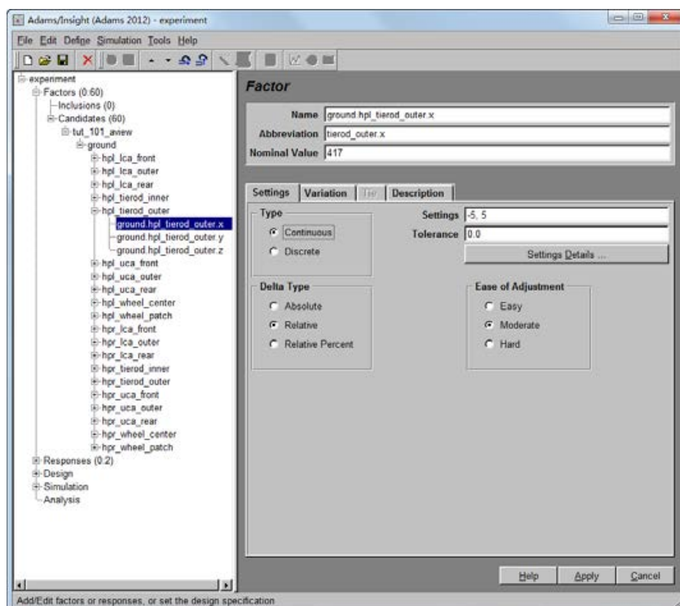


图 9-16　设置分析因素 hpl_tierod_outer.x

（4）选中两个分析响应，然后单击工具栏中的按钮，将“toe_left_REQ”和“toe_right_REQ”上移到“Inclusions”树状列表中。

（5）选择“toe_left_REQ”和“toe_right_REQ”，单击工具栏中的（设计规范）按钮，定义“Design Specification”如图 9-17 所示。

（6）单击“Apply”按钮，应用设置。

（7）创建 Work Space 并运行该模型。单击菜单栏中的“Define”→“Experiment Design”→“Create Design Space”命令，然后单击工具栏中的（列表）按钮，即可得到 ADAMS/View 中的工作矩阵，如图 9-18 所示。在确定了 Work Space 的信息之后，就可以进行仿真了。ADAMS/View 会按照矩阵中的参数进行 5 次仿真。

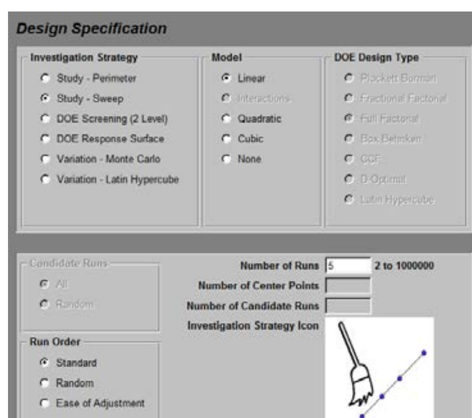


图 9-17　设置响应的属性

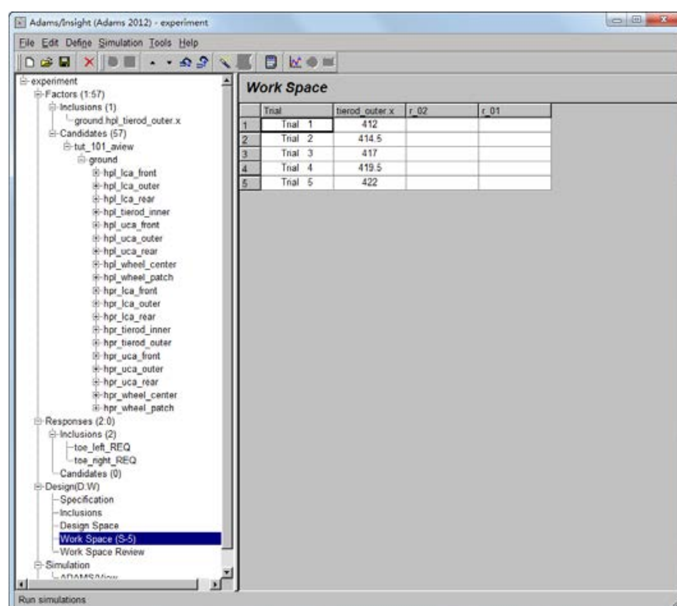


图 9-18　工作矩阵

（8）在 ADAMS/View 窗口菜单栏中单击“Simulate”→“ADAMS/Insight”→“Displaying”命令。

（9）在 ADAMS/Insight 的树形菜单“FreeView”中选择“Work Space Review”，如图 9-19 所示，可以清楚看到因素改变时对响应的影响。

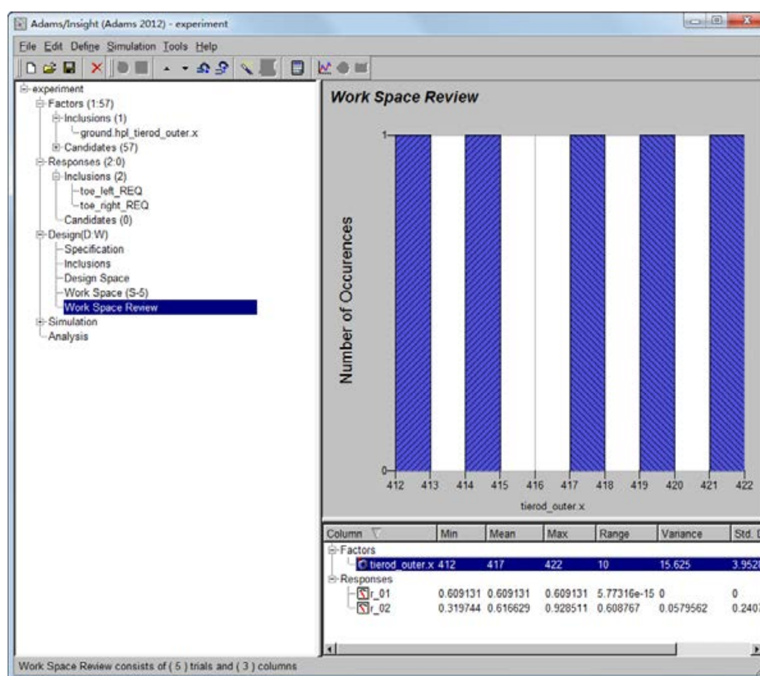


图 9-19　设计因素的改变对响应的影响

这里需要指出的是，任何形式的设计研究、DOE、优化或变量扫描都需要正确了解设计变量的边界。只有这样才能保证设计空间（Design Space）内所有的变量组合形式都是有物理意义的，且可以由 ADAMS/Solver 进行正确求解。

2. 设计因素的创建

在 ADAMS/View 中有两类变量会被 ADAMS/Insight 自动创建为预备的设计因素（Potential Factor），即结构点（Construction Point）和设计变量（Design Variables）。其他如几何属性和 Marker 点的位置不会认为是参数化的，也不是默认的设计因素，如果用户需要，则要自己创建，举例说明如下。

（1）用户可以先看一下在扫描研究中导入的模型，会看到有 60 个潜在的设计因素，它们都属于 ground part，如图 9-20 所示。

（2）返回 ADAMS/View，单击菜单栏中的“Tools”→“Table Editor”命令，在弹出的窗口中可以看到 20 个硬点，如图 9-21 所示，它们的 x、y、z 3 个坐标一共 60 个变量构成了全部的潜在设计因素。

（3）删除“hpl_tierod_outer”，并重新导出模型到 ADAMS/Insight 中，可以看到在删除了一个硬点之后，在扫描研究中只有 57 个潜在的设计因素。

（4）返回到 ADAMS/View 中，并创建一个设计变量。右击轮胎几何模型，在弹出的右键菜单中单击“Cylinder：WHEEL”→“Modify”命令，打开“Geometry Modify Shape Cylinder”对话框如图 9-22 所示。在“Length”文本框中右击，在弹出的右键菜单中单击“Parameterize”→“Creat Design variable”命令。

图 9-20　模型潜在的设计因素

	Loc_X	Loc_Y	Loc_Z
hpl_lca_front	67.0	-400.0	180.0
hpl_lca_rear	467.0	-450.0	185.0
hpl_lca_outer	267.0	-750.0	130.0
hpr_lca_front	67.0	400.0	180.0
hpr_lca_rear	467.0	450.0	185.0
hpr_lca_outer	267.0	750.0	130.0
hpl_uca_front	367.0	-450.0	555.0
hpl_uca_rear	517.0	-490.0	560.0
hpl_uca_outer	307.0	-675.0	555.0
hpr_uca_rear	517.0	490.0	560.0
hpr_uca_outer	307.0	675.0	555.0
hpr_uca_front	367.0	450.0	555.0
hpl_tierod_outer	417.0	-750.0	330.0
hpl_tierod_inner	467.0	-400.0	330.0
hpr_tierod_outer	417.0	750.0	330.0
hpr_tierod_inner	467.0	400.0	330.0
hpl_wheel_center	267.0	-760.0	330.0
hpr_wheel_center	267.0	760.0	330.0
hpl_wheel_patch	267.0	-760.0	0.0
hpr_wheel_patch	267.0	760.0	0.0

图 9-21　模型的 20 个硬点

（5）在 ADAMS/View 菜单栏中单击“Build”→“Design Variable”→“Modify”命令，在弹出的对话框中修改“Standard Value”值为 150，单击“Apply”按钮，如图 9-23 所示。可以看到轮胎的几何外形会随之改变。

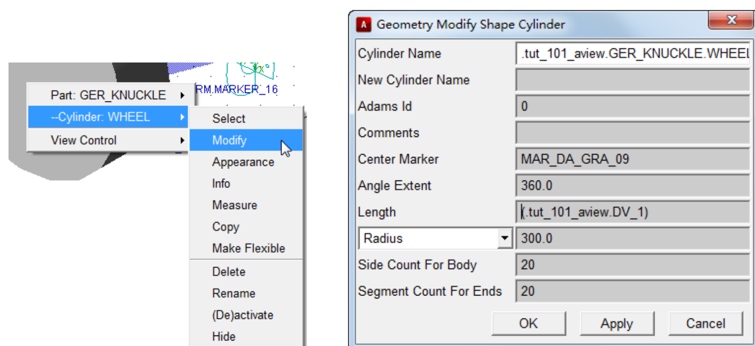


图 9-22　打开“Geometry Modify Shape Cylinder”对话框

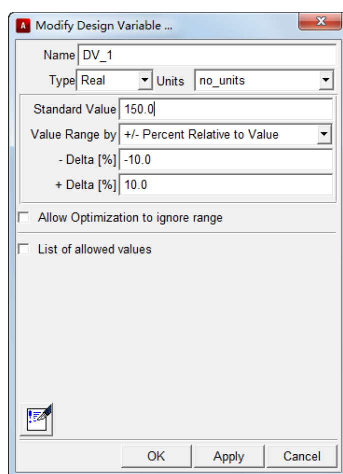


图 9-23　修改设计变量对话框

（6）重新导出模型到 ADAMS/Insight 中，可以看到在增加了一个设计变量后，在扫描研究中有 58 个潜在的设计因素。

在 ADAMS/View 中对模型进行参数化的基本方法，会使 ADAMS/Insight 自动将设计变量生成为潜在的设计因素。

3. 响应的创建

ADAMS/Insight 会自动在 ADAMS/View 模型中搜索设计目标（Design Objective），并把它自动添加为潜在的响应（candidate response）。用户可以通过 Modify Design Objective 查看模型中已有的 Design Objective，具体操作步骤如下：

（1）导入“ain_tut_101_aview.cmd”模型。

（2）单击菜单栏中的“Simulate”→“Design Objective”→“Modify”命令，来定义设计目标。

在 ADAMS/View 中有以下 5 类参数可以定义为设计目标：

- 测量特性（Measure characteristics）。

- 请求特性（Request characteristics）。
- 结果特性（Result set characteristics）。
- ADAMS/View 的函数。
- ADAMS/View 的宏和变量。

下面分别举例说明如何创建这 5 种设计目标，在此之前先介绍一个获取 Objective 值的命令。

（3）进行一个 2.0s、100 步的仿真。

（4）按 F3 键显示命令行，输入“optimize objective evaluate objective_name=toe_ left_REQ”，按 Enter 键，得到如下结果，如图 9-24 所示。

“.model_1.toe_left_REQ（.model_1.Last_Run）=0.6272235686（NO UNITS）”。

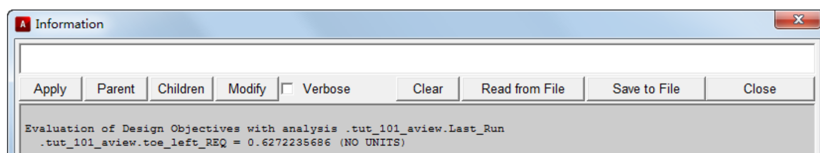


图 9-24　获取 Objective 的值

4. Objective 的创建

（1）基于 Measure 的方法，这是创建 Objective 最简单的方法，具体操作步骤如下：

1）导入“ain_tut_101_aview.cmd”模型。

2）右击球铰“jl_uca_ball”，在弹出的右键菜单中单击“-marker.MARKER_10”→“measure”命令，创建一个 Measure 测量位移的幅值，并命名为 MEA_marker_displacement，如图 9-25 所示。

3）单击菜单栏中的“Simulate”→“Design Objective”→“New”命令，基于 Measure 创建设计目标，如图 9-26 所示进行设置。

4）进行一个 2.0s、100 步的仿真。

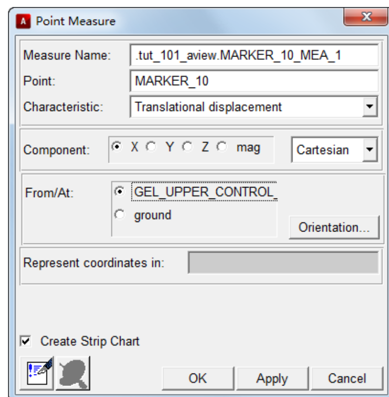


图 9-25　创建一个 Measure

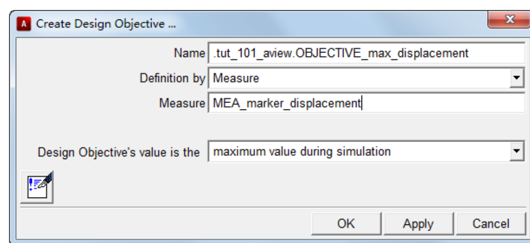


图 9-26　基于 Measure 创建设计目标

5）按 F3 键显示命令行，输入“optimize objective evaluate objective_name = OBJECTIVE_max _displacement”，按 Enter 键，得到如下结果，如图 9-27 所示。

“.tut_101_aview. OBJECTIVE_max_displacement=313.1465373167 (meter)”。

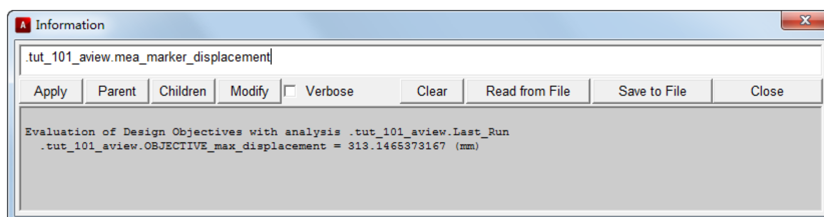


图 9-27　获取 OBJECTIVE_max_displacement 的值

(2)基于 Request 特性。基于 Request 特性创建 Objective 也很容易实现，如图 9-28 所示，用户只需在“Definition by”文本框内输入 Request 的名称即可，模型中的 objective:toe_left_REQ 和 toe_right_REQ 就是基于 Request 创建的。

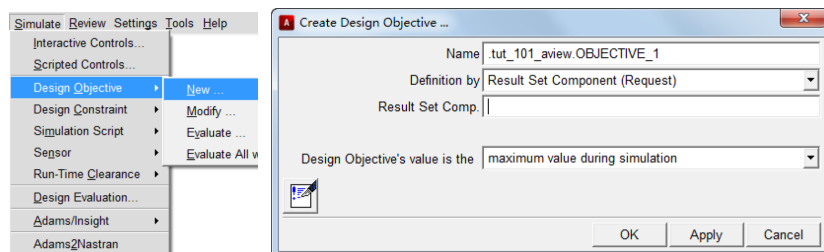


图 9-28　基于 Request 创建设计目标

(3）基于 ADAMS/View 函数创建 Objective。ADAMS/View 函数是 ADAMS/View 中强有力的工具，基于它可以创建复杂的响应，这些响应超出了 Measure 和 Request 的范围。例如，用户可以创建频域响应的方法是利用 ADAMS/View 提供的快速傅立叶变换函数 FFTMAG()。由于该函数要求一组完整的数据，因此只能在一次仿真结束后再计算所要的结果。下面举例说明，创建的 Objective 是上控制臂转角的幅值，具体操作步骤如下：

1）导入“ain_tut_101_aview.cmd”模型。

2）进行一个 2s、100 步的仿真。

3）创建一个名为“meas_uca_angle”的测量来跟踪旋转铰“jl_uca”，如图 9-29 所示。

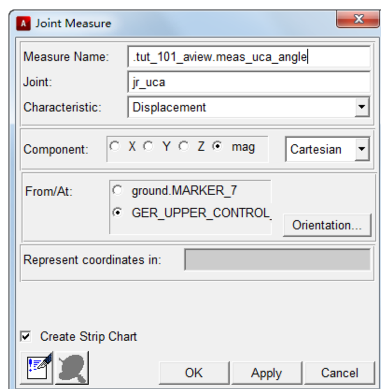


图 9-29　创建测量 meas_uca_angle

4）基于 ADAMS/View 的函数创建 Objective，命名为“OBJECTIVE_max_freq_ mag”，如图 9-30 所示。

5）此时用户需要利用 Function Builder 创建一个函数，如图 9-31 所示，函数的表达式如下：

MAX (FFTMAG (.model_1 . jl_uca_MEA_meas_uca_angle, COLS (.model_1 . jl_uca_MEA _meas_uca_ angle)))

设定的参数（Argument）为：analysis；给定的函数名（Name）为：func_max_fft_mag。单击“Evaluate”按钮，检查测试函数表达式是否正确，最后单击“OK”按钮。

6）单击“OK”按钮，创建“Design Objective”。

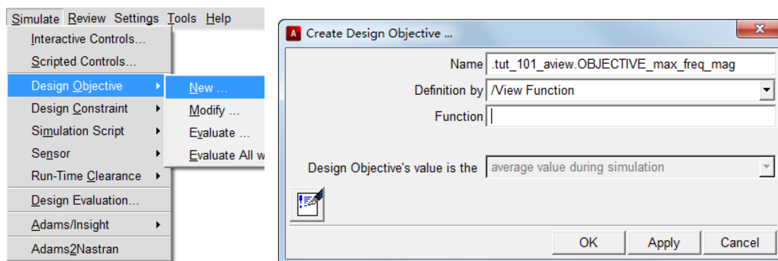


图 9-30　基于函数创建设计目标

7）进行一个 2.0s、100 步的仿真。

（4）基于 ADAMS/View 宏（Macro）和变量（Variable）创建 Objective。利用宏创建 Objective 是 ADAMS/View 提供的最强有力的方式，与利用 ADAMS/View 的函数创建方法相比，它具有以下优点：

- 函数是单一表达式，很长很复杂。宏可以有很多行，可以进行连续的计算。
- 宏具有与 C 或 Fortran 子程序同样的形式，可读性更强。

● 宏可以直接调用 ADAMS/View 的环境变量。

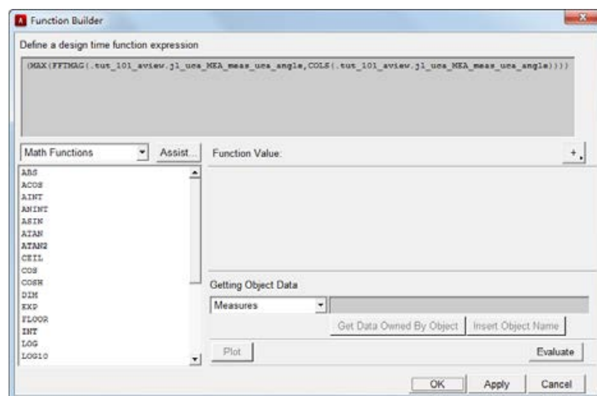


图 9-31　函数的创建

下面举例说明，如何利用宏创建一个与前述基于函数的 Objective 相同的 Objective：

1）导入“ain_tut_101_aview.cmd”模型。

2）进行一个 2s、100 步的仿真。

3）创建一个新的 Objective，命名为“obj_max_freq_macro”，如图 9-32 所示。

4）在“Macro”文本框中右击，在弹出的右键菜单中单击“Creat”命令，系统弹出宏的表达式对话框。

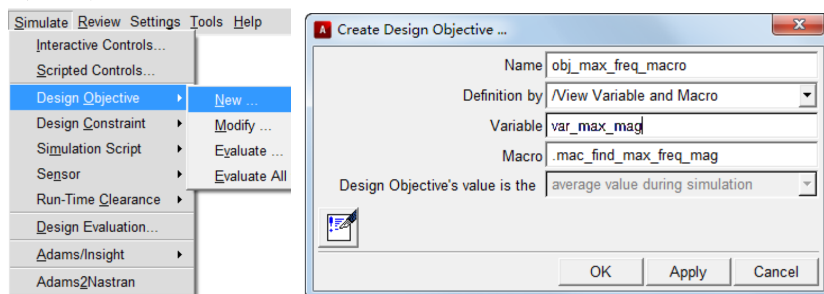


图 9-32　宏的创建

5）将宏命名为“mac_find_max_freq_mag”，输入的宏命令如下。

```
variable set variable_name=the_fft&
real_value=(eval(FFTMAG(meas_uca_angle, COLS(meas_uca_angle))))
! 创建并初始化一个变量，使其等于 Measure 的 FFT
variable set variable_name=max_mag real_value=(eval(max(the_fft)))
! 创建并包含一个变量使其等于 FFT 的最大值
variable set variabl_name=var_max_mag real_value=(eval(max_mag))
! 把前述变量的值传递给变量 var_max_mag
```

6）定义 Objective 使用的变量名称，它必须与宏的结果变量名称“var_max_mag”相同，如图 9-33 所示。

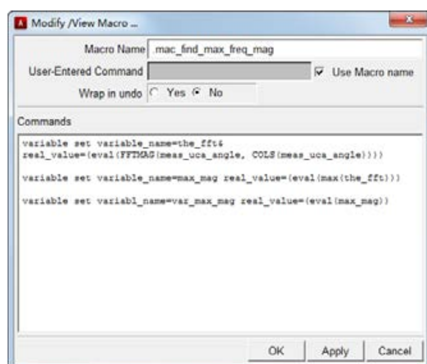


图 9-33　宏的表达式

7）测试该 Objective 的值，它应该与基于函数创建的 Objective 有相同的结果。

9.2.3　回归分析

前面介绍的内容偏重于方差分析（Analysis of Variance，ANOVA），即分析各个有关因素对试验响应的影响。下面将介绍 ADAMS/Insight 的回归分析功能，所谓回归分析是研究因素和响应相关关系的一种数学工具，它能帮助用户根据一个设计变量的响应值去估计另一设计变量的响应值。

ADAMS/Insight 提供了 4 类模型来拟合因素和响应之间的关系：

- 线性模型（Linear）。
- 交互模型（Interation）。
- 二次模型（Quadratic）。
- 三次模型（Cubic）。

假设一个单一响应两个因素的模型，以上 4 种模型的表达式如下：

- 线性：$A+B\ X_1+C\ X_2$。
- 交互：$A+B\ X_1+C\ X_2+D\ X_1\ X_2$。
- 二次：$A+B\ X_1+C\ X_2+D\ X_1\ X_2+E\ X_1^2+F\ X_2^2$。
- 三次：$A+B\ X_1+C\ X_2+D\ X_1\ X_2+E\ X_1^2+F\ X_2^2+G\ X_1\ X_2^2+H\ X_2\ X_1^2+I\ X_1^3+J\ X_2^3$。

这 4 种模型未知数的个数分别为 3、4、6、10。

下面举例说明，如何利用 ADAMS/Insight 进行回归分析，在本例中将单独运行 ADAMS/Insight，具体操作步骤如下：

（1）启动 ADAMS/Insight。

（2）新建文件，单击菜单栏中的“File”→“New”命令。

（3）创建两个设计因素。单击菜单栏中的“Define”→“Factor”命令，按图 9-34 所示修改设计因素。设置完毕单击“Apply”按钮保存设置。

（4）创建一个响应。单击菜单栏中的“Define”→“Response”命令，在弹出的对话框中，将“Abbreviation”属性设置为“response_1”，其他保留默认设置，如图 9-35

所示，单击“Apply”按钮保存设置。

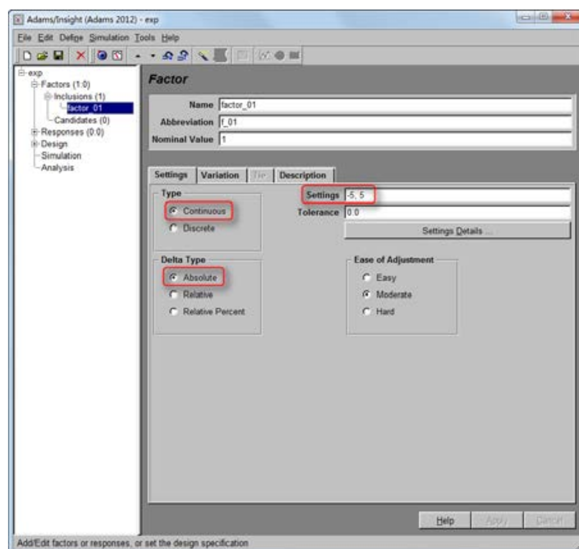


图 9-34　创建因素

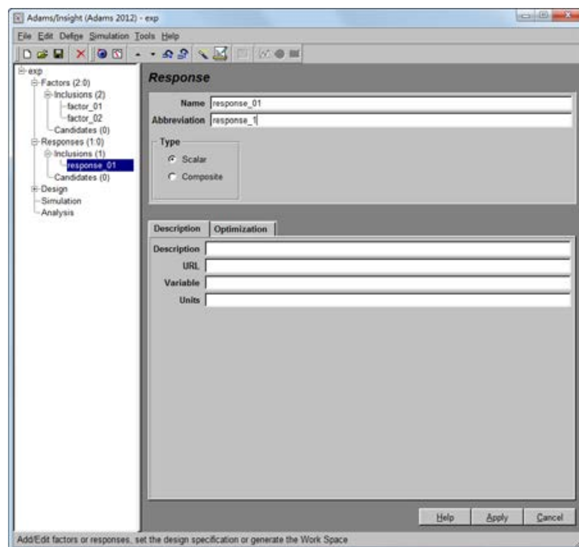


图 9-35　创建一个响应

（5）创建一个试验（Experiment）。单击菜单栏中的“Define”→“Experiment Design”→“Set Design Specification”命令，在弹出的对话框中给定设计类型，如图 9-36 所示。设置完毕单击“Apply”按钮保存设置。

（6）单击工具栏中的按钮，打开工作空间，可以看到此时试验已经创建，但是还没有响应，如图 9-37 所示，需要填入响应值。一种方法是从 ADAMS/Insight 导出工作空

间为 CSV 的文件，然后利用表格计算工具，例如 Excel 计算得出响应值；另一种方法是利用 ADAMS/Insight 提供的计算器（Calculator）进行计算。

（7）单击菜单栏中的“Tools”→“Work Space”→“Column Calculator”命令，打开工作空间计算器如图 9-38 所示。

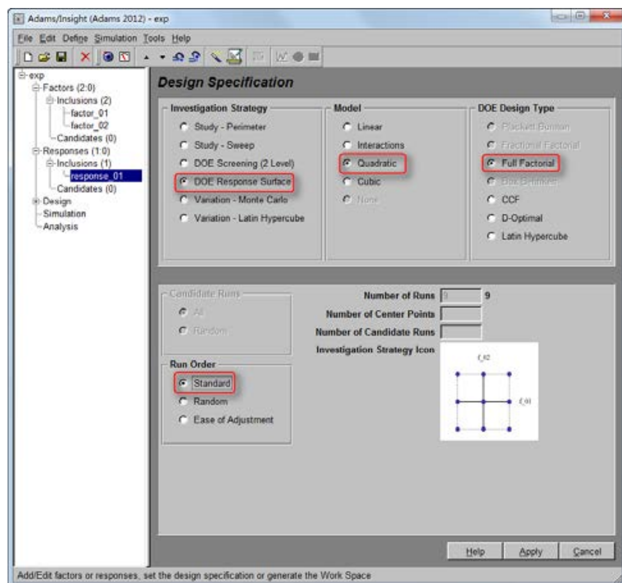


图 9-36　设计类型的设定

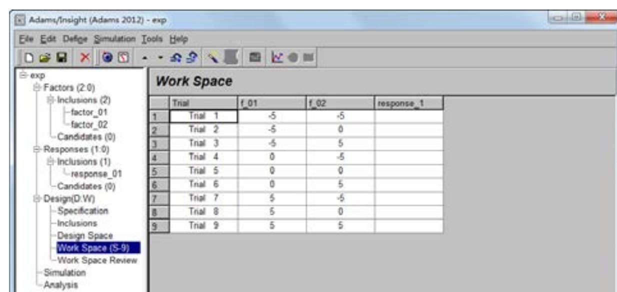


图 9-37　工作空间

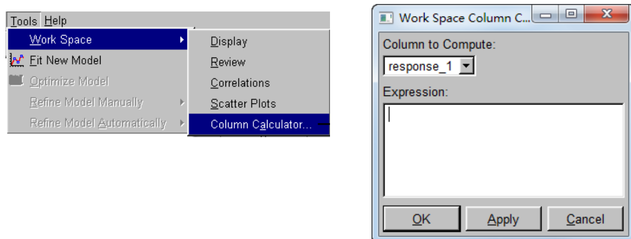


图 9-38　打开工作空间计算器

（8）在“Expression”文本框中输入如下表达式。

3+7*f_01+f_02+4*f_01*f_02+5*f_02**2

即：

Response=3+7X1+X2+4X1X2＋5X22

单击“OK”按钮，赋值后的工作空间如图 9-39 所示。

图 9-39　赋值后的工作空间

（9）拟合模型。单击工具栏中的按钮。

（10）分析结果。在“Analysis”树状列表中选择“Model”，在“Regression”列表中选择“response”，如图 9-40 所示，这些统计结果表明了拟合的好坏。

图 9-40　拟合结果

对这些统计术语可以参考 ADAMS/Insight 提供的在线帮助。ADAMS 2012 的帮助都是超文本链接的，用起来很方便。例如，单击菜单栏中的“Help”→“ADAMS/Insight”→“索引”→“Response summary”命令，然后选择感兴趣的术语，就可以得到相关解释，如图 9-41 所示。下面分析几个常用术语及其含义。

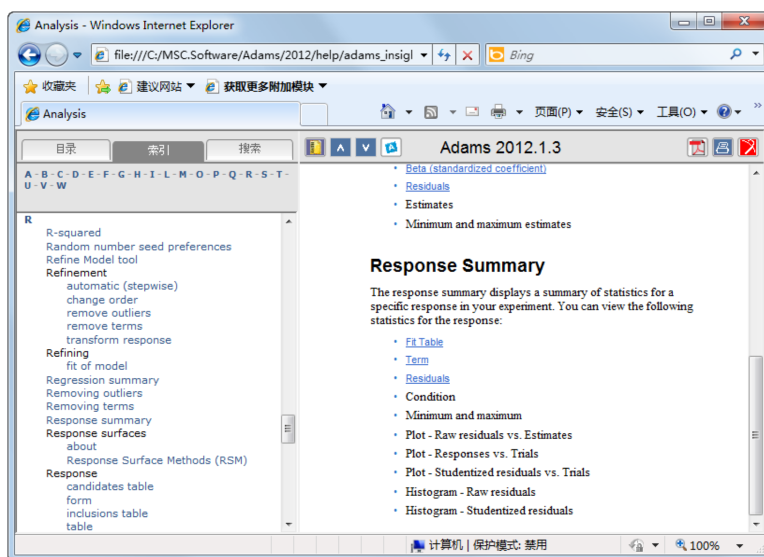


图 9-41　ADAMS/Insight 在线帮助

（11）在“Regression”列表中选择“Summary”，从“Display”列表中选择“Rules-of-thumb summary”，如图 9-42 所示。Term 后面的符号表明该项的拟合可能有问题，Term 是指拟合表达式中的各项，如一次项、二次项。

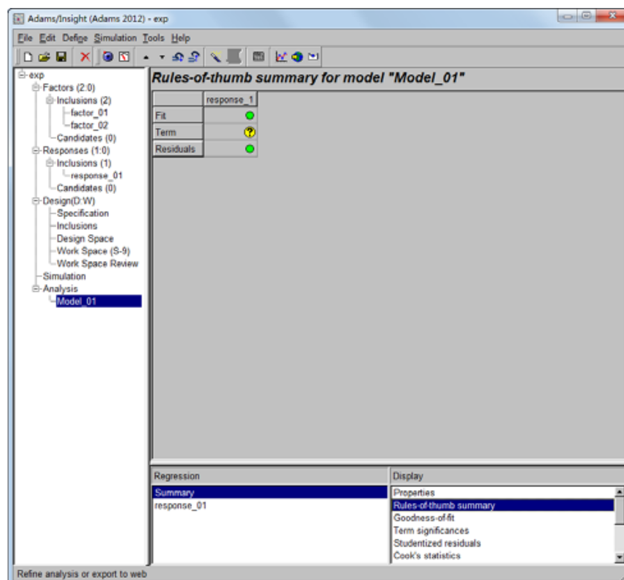


图 9-42　拟合结果分析

（12）在“Display”列表中选择“Goodness-of-fit”，如图 9-43 所示，其中：

- R2 是指回归模型的平方和与原始数据的平方和之比，介于 0～1 之间，越大越好，通常好的拟合大于 0.9。

● R2adj 通常要小于 R2，如果 R2 很高，而 R2adj 很低，表明模型中有些项是多余的，应当从模型中去掉一些项。如果 R2adj 的值为 1，表明拟合得非常好。

● P 表明拟合表达式中的项是否有用。如 P 等于 0.02 表明至少有一项与响应相关。而一个比较高的值，如 P 等于 0.3，则表明表达式中的项完全与响应无关。

● R/V 表明模型的计算值与原始数据点之间的关系。该值越高越好，大于 10 表明模型的预测结果很好，而比较低的值，如低于 4，表明模型的预测结果完全不可信。

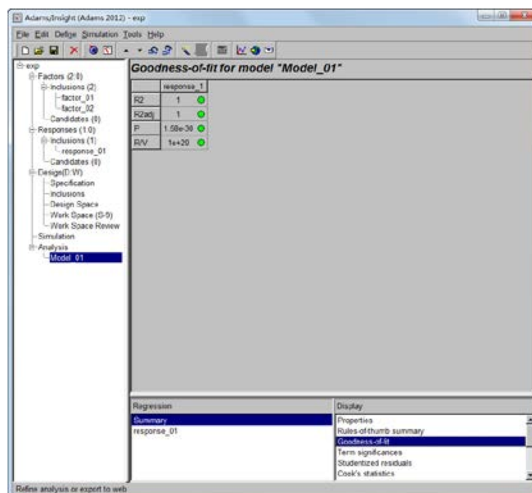


图 9-43　Goodness-of-fit 中各项的值

（13）判断各项的重要性，即 Term significance。在“Display”列表中选择“Term significances”，如图 9-44 所示。可以看到在 5 项中（有一项是常数）值很小的项都表明很好，即对响应有较大的影响。

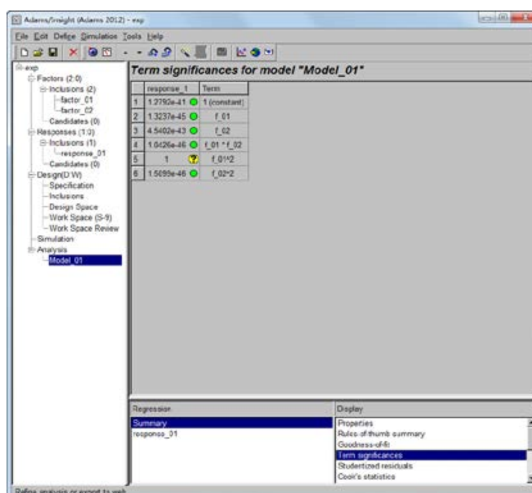


图 9-44　查看 Term significances 各项的值

（14）在“Display”列表中选择“Term coefficients”，如图 9-45 所示，可以看到

ADAMS/Insight 根据数据确定的系数都很好。对于数学模型：

$A+BX_1+CX_2+DX_1X_2+EX_1^2+FX_2^2$

所确定的响应如下：

Response=3+7X1+X2+4X1X2+5X22

可以看到 ADAM/Insight 利用最小二乘法确定的系数 A、B、C、D、E、F 都是正确的。

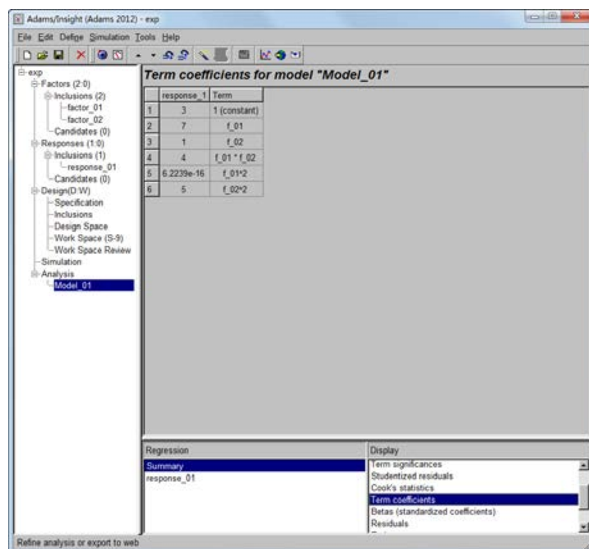


图 9-45　查看 Term coefficients 各项的值

（15）在“Summary”列表中查看残差（residuals），它直接表明预测值和原始值的差别，在本试验中，这些值都为零。

在左边列表中的 response_01 里包含了一项 Terms，以一种简洁的方式给出了上面介绍的内容。在“Regression”列表中选择“response_01”，在“Display”列表中选择“Terms”，如图 9-46 所示，它包括如下内容：

- 各项的系数（Coef）。
- 各项是否重要的概率（P）。
- 各项的定义（term）。
- 其他的信息，包括标准差（Std Error）和 T 检验（T）。
- Fit 显示模型的统计特性，如图 9-47 所示。其中 R2 和 R2adj 是最重要的，如果这两个结果不好，再考虑其他的统计指标。
- Residuals 显示拟合模型给出的估计值与真实值的差异，如图 9-48 所示。除了要求差异小以外，各个 run 之间差异的一致性也很重要，若误差主要体现在几个 run 上，说明所设定的模型过于简单或阶次偏低。

上述试验中的情况（R2=1，P=1.58E-30），在真实世界中是不会发生的。如果统计指标表明模型存在问题，用户可以对模型进行改进。

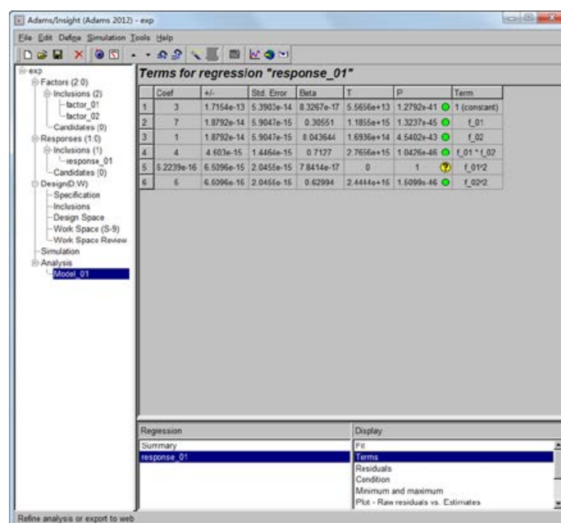


图 9-46　Terms for regression 中各项的值

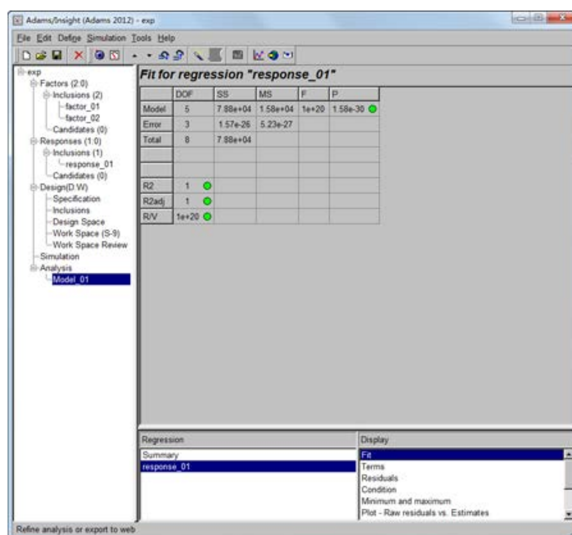


图 9-47　模型的统计特性

单击菜单栏中的“Tools”→“Refine Model Manually”命令，在弹出的子菜单中有以下几个选项：

- 删除离群点（Remove Outliers）：可以从结果中把某一个 run 的结果完全去掉，例如在实际调整模型时，如果不恰当地改变了设计因素，可以把那次的结果去掉。
- 删除项（Remove Terms）：去掉拟合模型中的某一项。例如在模型中设定了一个交互项，而实际试验中设计因素之间没有相互影响。
- 响应变换（Transform Response）：可以对结果进行运算。

- 改变阶次（Change Order）：可以改变整个模型的阶次。

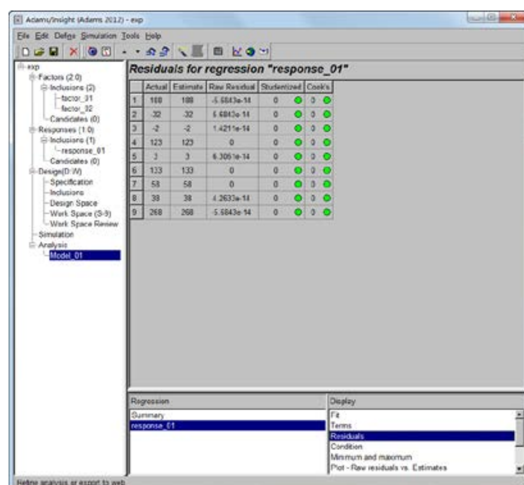


图 9-48　估计值与真实值的差异

下面将去掉模型中无用的项来改进模型。

在“Regression”列表中选择“response_01”，再在“Display”列表中选择“Terms”时，可以看到第 5 项是有问题的，即X_1^2项。从响应表达式中把该项去掉，单击菜单栏中的“Tools”→“Refine Model Manually”→“Remove Terms”命令，如图 9-49 所示，选择“factor_1ˆ2”作为移除项。

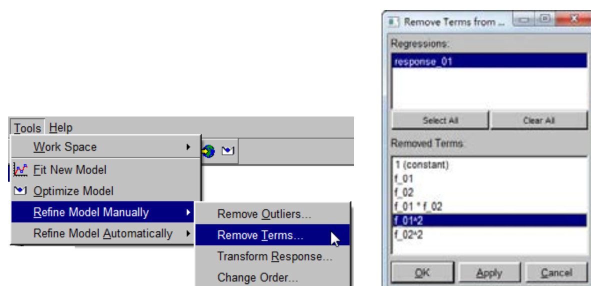


图 9-49　选择要去掉的项

通过比较删除前后的 P 统计值，可以看到模型已经得到了改进。

下面将讨论交互模型（Interactions）是否也能很好地拟合。首先把X_1^2项重新放回到模型中，单击菜单栏中的“Tools”→“Refine Model Manually”→“Remove Terms”命令，选择“factor_1ˆ2”，单击“OK”按钮。

单击菜单栏中的“Tools”→“Refine Model Manually”→“Change Order”命令，系统弹出如图 9-50 所示的对话框，点选“Interactions”单选钮，单击“OK”按钮。

接着检查 response_01 下 Fit 和 Terms 的结果，会发现拟合结果很差，如图 9-51 和图 9-52 所示。

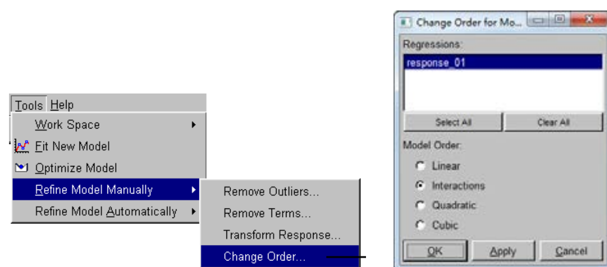


图 9-50　Change Order 对话框

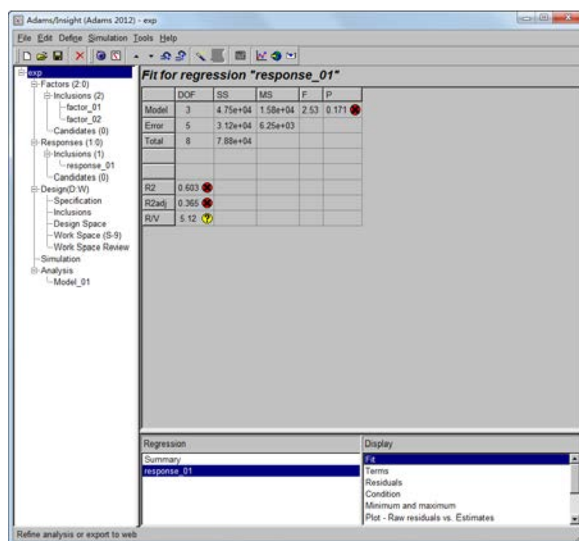


图 9-51　response_01 下的 Fit

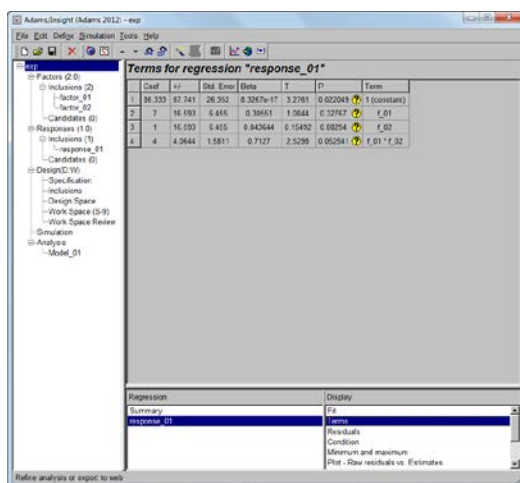


图 9-52　response_01 下的 Terms

上述结果说明，Interactions 模型无法适合当前的设计空间。

9.3 蒙特卡罗方法应用

下面简单介绍一下蒙特卡罗方法在 ADAMS/Insight 中的应用。

（1）启动 ADAMS/View。

（2）将 ADAMS 2012 安装目录下的 ainsight\examples\ain_tut_141_aview.cmd 模型复制到 ADAMS 工作目录下。为了方便使用，把该文件附在光盘 yuanwenjian\ch_12\example 文件夹下，文件名为 ain_tut_ 141_aview.cmd。

（3）导入模型文件 ain_tut_141_aview.cmd，如图 9-53 所示，导入的是一个发射车辆模型（launch vehicle）。

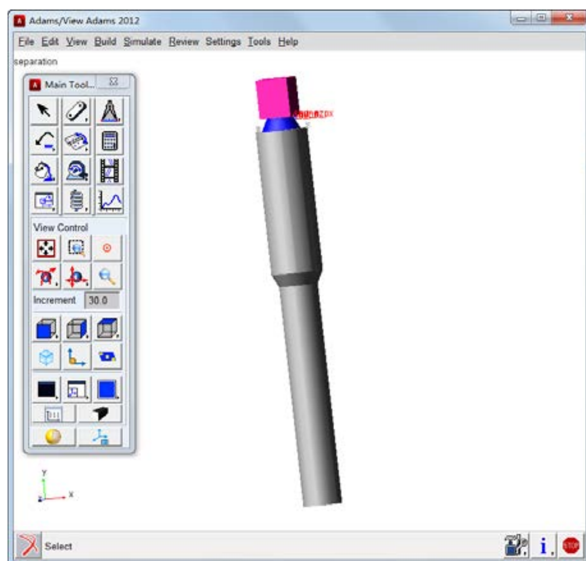


图 9-53　导入的模型

（4）单击菜单栏中的“Simulate”→“Scripted Controls”命令，系统弹出图 9-54 所示的对话框，选择默认的 Simulation Script Name“.separation.Sep_script”进行仿真。然后单击菜单栏中的“Review”→“Animation Controls”命令，系统弹出图 9-55 所示的对话框。通过动画可以看到 4 个弹簧力用来描述 4 个力，这些力把飞行器与发射车辆分离。

（5）单击菜单栏中的“Build”→“Measure”→“Display”命令，弹出图 9-56 所示的对话框，可以看到模型中包含了 4 个 Measure，分别用来测量飞行器的 3 个角速度和分离速度。

（6）单击菜单栏中的“Simulate”→“Design Objective”→“Modify”命令，系统弹出如图 9-57 所示的对话框，可以看到包含了 4 个基于 Measure 的设计目标。从 Information 中可以看到这 4 个 Objective 的值等于仿真结束时的值。

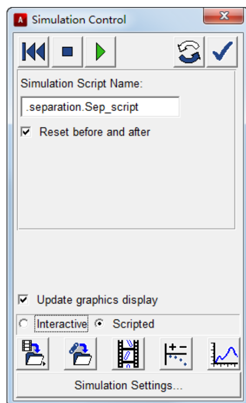


图 9-54 “Scripted Control”对话框

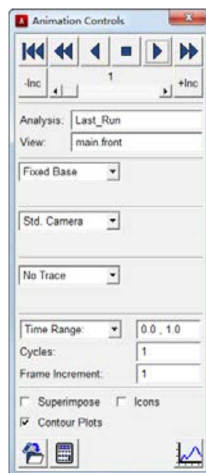


图 9-55 “Animation Controls”对话框

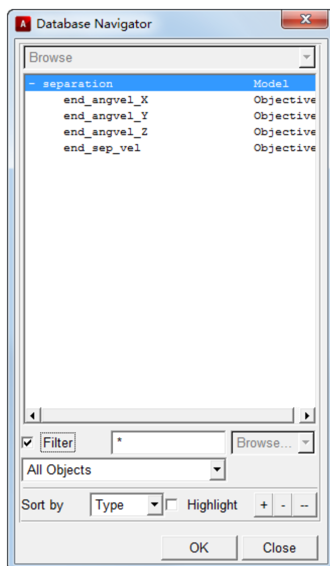


图 9-56 测量数据库对话框

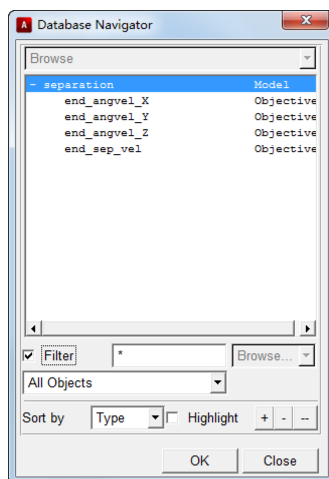


图 9-57 Objective 导航数据库

接下来的内容中将介绍如何通过 ADAMS/Insight 了解模型的性能。

（7）把模型导入到 ADAMS/Insight 中。单击菜单栏中的“Simulate”→“ADAMS/Insight”→“Export”命令，如图 9-58 所示，接受系统默认设置，单击“OK”按钮。

（8）在 ADAMS/Insight 的界面中包含了 8 个设计因素和 4 个响应。连续选择所有的设计因素和响应，然后单击工具栏中的按钮，包含所有的设计因素和响应。

（9）设定设计因素的特性。设置飞行器 x 方向的转动惯量“spacecraft_lxx”，如图 9-59 所示。注意和蒙特卡罗有关的设定，具体包括公差（Tolerance）和概率分布函数（Variation Distribution）。

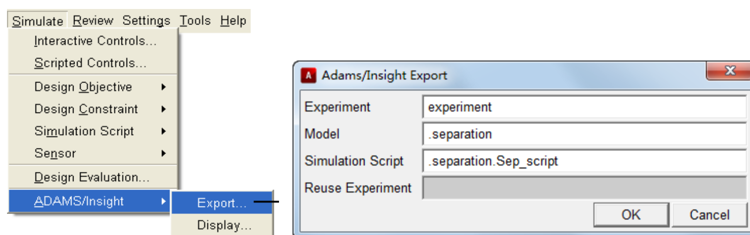


图 9-58　导入模型到 ADAMS/Insight

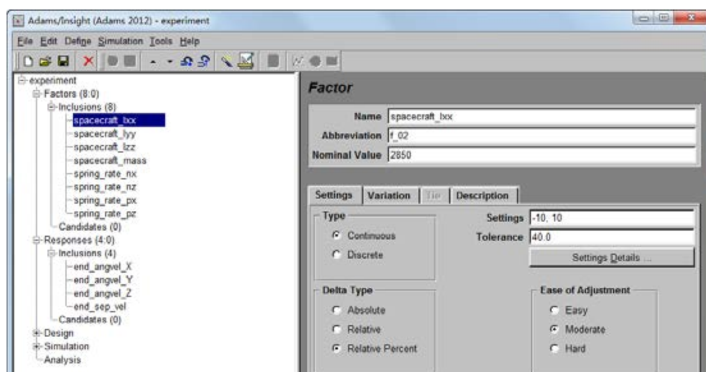


图 9-59　设计因素的特性

（10）其他的设计因素特性如下：飞行器的转动惯量“spacecraft_Iyy”和“spacecraft_Izz”的公差分别为 30 和 35；飞行器质量“spacecraft_mass”的公差为 23，概率分布为均匀分布；4 个弹簧刚度的公差为 200。

（11）设定试验（Design Specifications）。设定试验内容如图 9-60 所示。

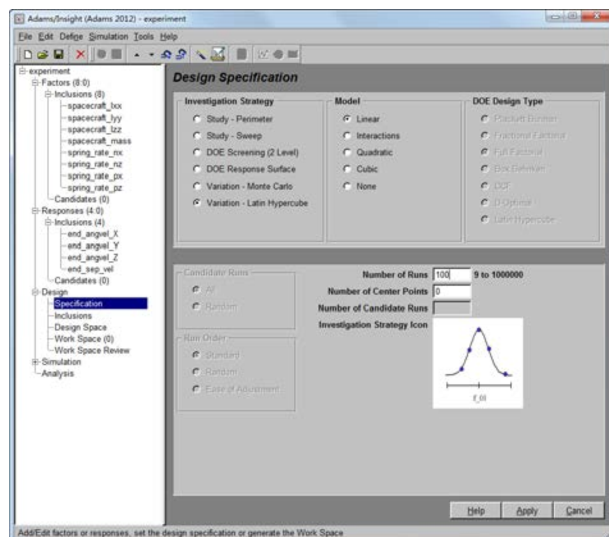


图 9-60　设定试验

（12）创建工作空间。从设计矩阵可以看到当前的响应列为空，如图 9-61 所示。

（13）在左边的树状列表中选择“Design”→“Work Space Review”，可以看到各个设计因素的直方图。如图 9-62 所示为设计因素 f_01 的直方图。

（14）对系统进行仿真分析，其仿真结果如图 9-63 所示。

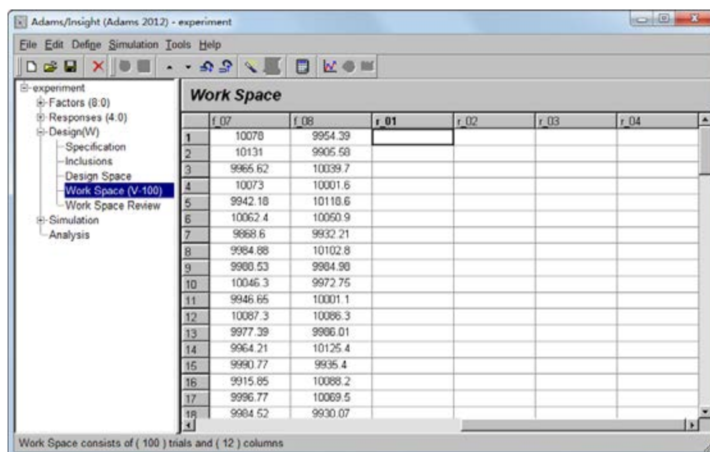


图 9-61　创建工作空间

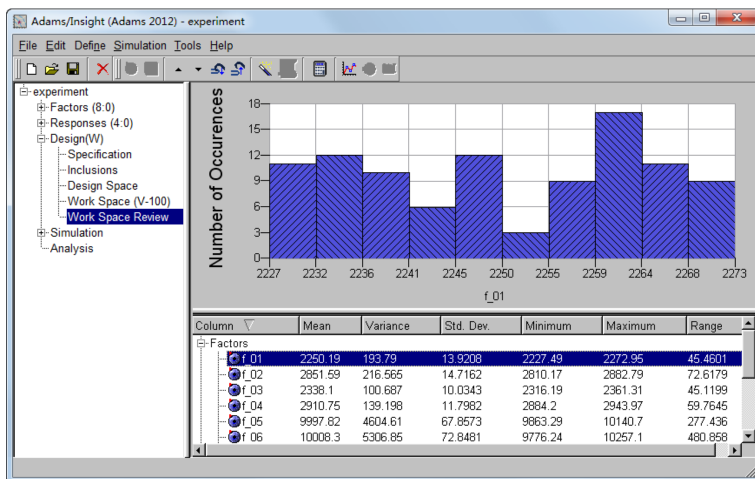


图 9-62　设计因素 f_01 的直方图

（15）在 ADAMS/View 界面中，单击菜单栏中的“Simulate”→“ADAMS/Insight”→“Display”命令。

（16）在左边的树状列表中选择“Design”→“Work Space”，可以看到仿真结果，此时的响应列不再为空。

（17）在左边的树状列表中选择“Design”→“Work Space Review”。选择第一个响应“r_01”，如图 9-64 所示。可以看到在直方图下的表格中给出了均值、方差、标准差、最小值、最大值及变化的范围。

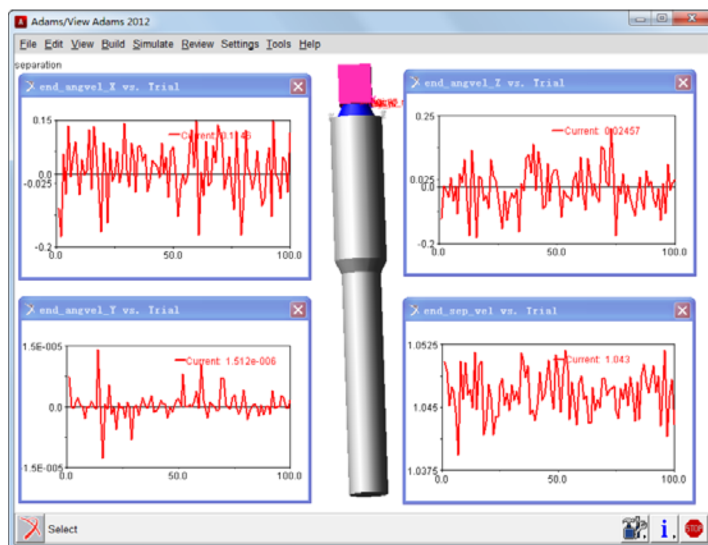


图 9-63　仿真结果

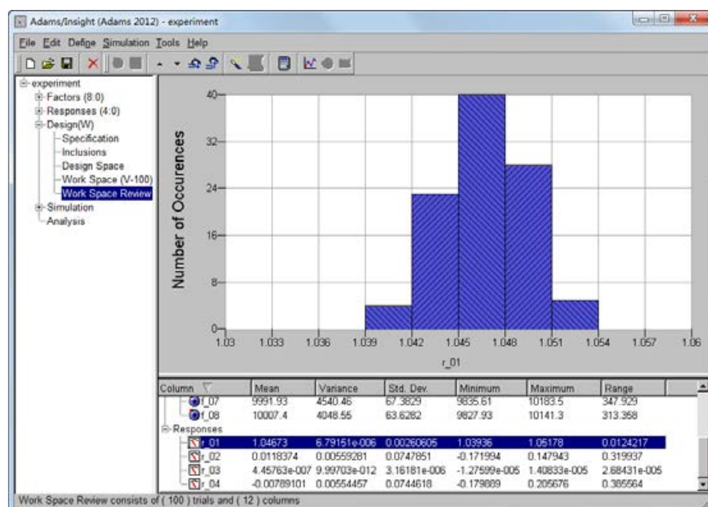


图 9-64　选择响应 r_01

第 10 章

振动分析

振动分析模块 Vibration 是 ADAMS 针对 Car、View 等模块添加的频域分析功能插件。利用振动分析模块可以进行受迫振动分析，并根据分析结果预测振动带来的后果。本章详细讲解了 Vibration 模块的使用过程，主要包括建立输入通道、激振器、输出通道以及对测试结果的时频域分析。

学习要点

- 建立模型、模型仿真、建立输入通道、建立输出通道
- 测试模型和验证模型
- 精化模型和优化模型

第10章　振动分析

ADAMS/Vibration 振动分析模块通过利用激振器的虚拟测试，代替产品昂贵的物理模型进行振动分析，从而达到更快、更有效地设计开发的目的。物理模型的振动测试通常是在设计产品的最后阶段进行，而通过 ADAMS/Vibration 振动分析模块可以在产品的设计初期进行，大大降低了设计时间和成本。利用 ADAMS/Vibration 振动分析模块可以实现以下功能：

（1）分析模型在不同作用点下的频域受迫响应。

（2）增加了水力学、控制模块和用户自定义系统在频率分析中的影响。

（3）从 ADAMS 线型模型到 ADAMS/Vibration 振动分析模块的完全快速的传递。

（4）为振动分析建立输入/输出通道。

（5）指定频域输入函数，如正弦扫描、功率谱（PSD）等。

（6）建立用户自定义、基于频率的作用力。

（7）求解特定频域的系统模态。

（8）计算频率响应函数求幅频特性。

（9）动态显示受迫响应及单个模态响应。

（10）列表显示系统各阶模态对受迫响应的影响。

（11）列表显示系统各阶模态对动态、静态和发散能量的影响。

利用 ADAMS/Vibration 振动分析模块，可以把不同的子系统装配起来，进行线性振动分析，利用 ADAMS 后处理工具把结果以图表或动画的形式显示出来。图 10-1 所示为 ADAMS/Vibration 振动分析模块的处理过程。要进行振动分析，首先通过 ADAMS/Aircraft、ADAMS/Car、ADAMS/Engine、ADAMS/Rail、ADAMS/View 等模块对模型进行前处理，然后利用 ADAMS/Vibration 振动分析模块进行振动分析，最后通过 ADAMS/Post Processor 对结果进行后处理，包括绘制和动画显示受迫振动和频率响应函数，生成模态坐标列表，显示其他的时间和频率数据。

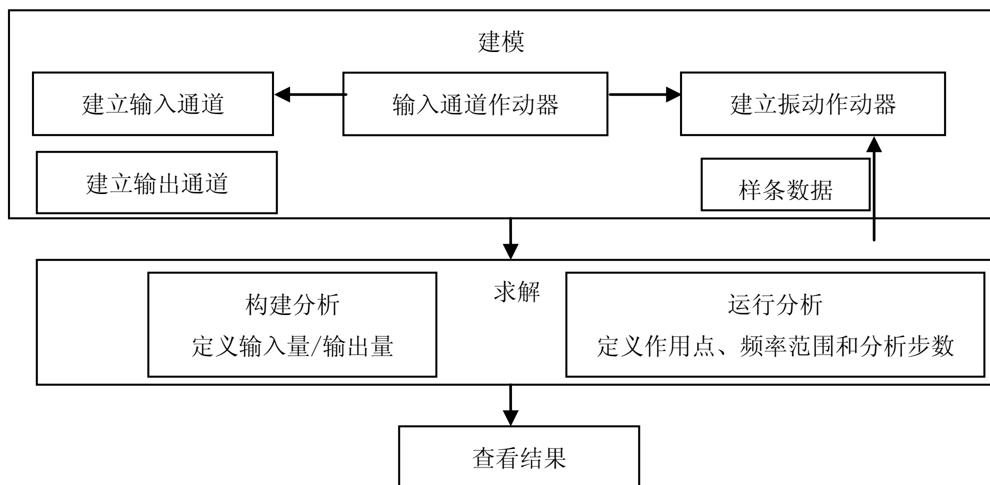


图 10-1　ADAMS/Vibration 流程

本章内容通过对卫星太阳能帆板展开前的操作以及与发射机座的分离等过程的振动分析，了解 ADAMS/Vibration 振动分析模块的具体操作过程（流程如图 10-2 所示）。

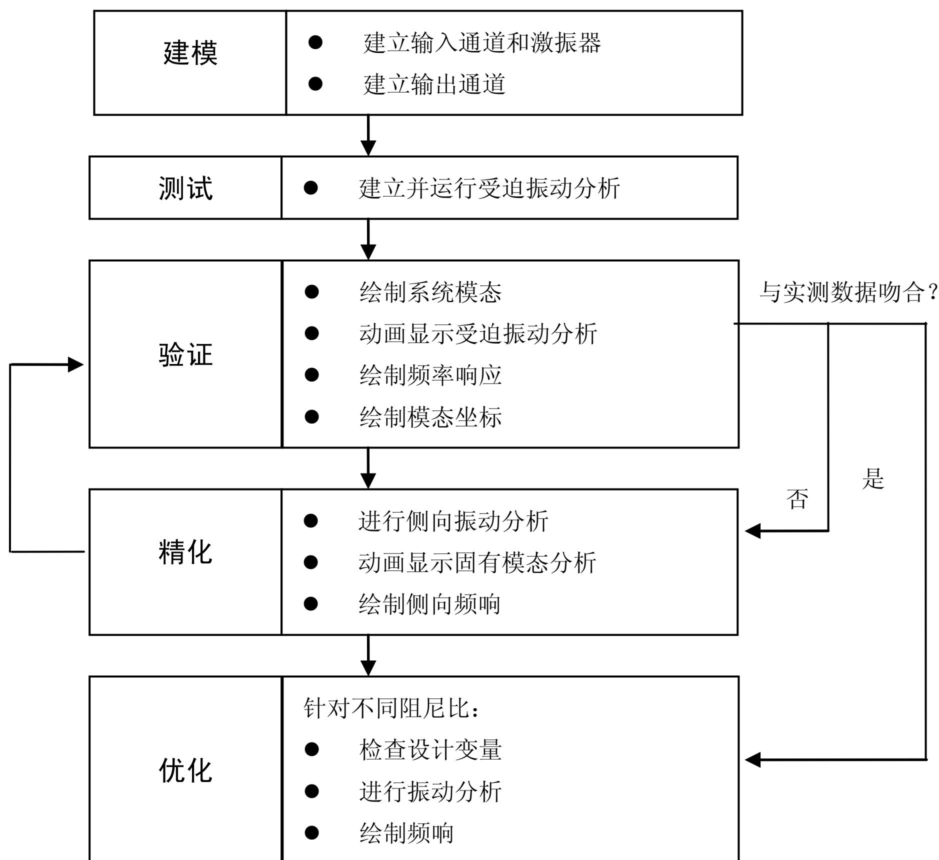


图 10-2　振动分析步骤

10.1 建立模型

（1）通过“开始”→“所有程序”运行 Adams-View 2012，或直接双击桌面上的快捷方式 Adams - View 2012，运行 ADAMS 2012。

（2）在欢迎对话框中选择 Existing Model，如图 10-3 所示，单击 OK。

（3)在打开的选择文件对话框中,File Name 一栏中右击,在 Search 中找到 examples 下的 tutorial_satellite 并单击，选中 satellite.cmd 文件后单击打开按钮，如图 10-4 所示。

（4）在 View 主窗口内显示卫星模型，在工具栏中点 Render 可渲染模型，如图 10-5 所示。

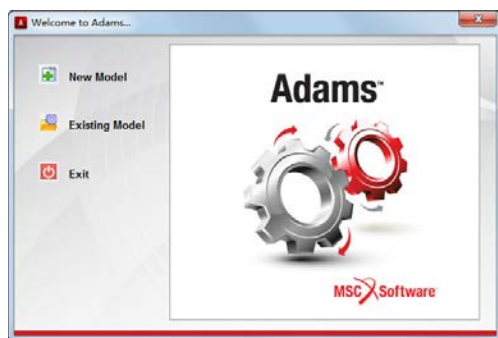


图 10-3　设置界面

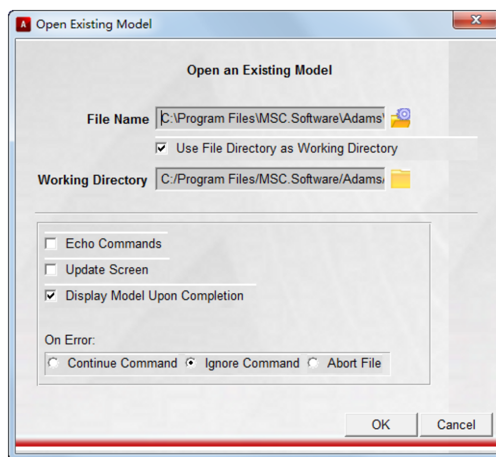


图 10-4　输入文件

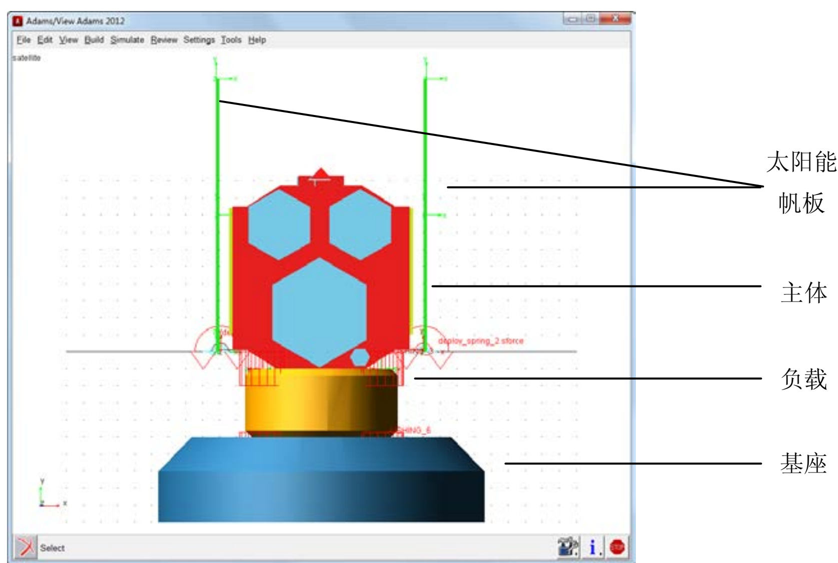


图 10-5　卫星模型

（5）由于 ADAMS/Vibration 是插件模块，需要单独添加。在 Tool 菜单，选择 Plugin Manager，选中 ADAMS/Vibration 栏 Load 项下的 Yes 选项以加载 Vibration 模块，如图 10-6 所示。

对于新模型，需要载入 ADAMS/Vibration 振动分析模块；而对于已有的振动分析模型，则无须再载入该模块，因为在打开模型时已经自动载入相关模块了。

（6）选择完毕，单击 OK 按钮。

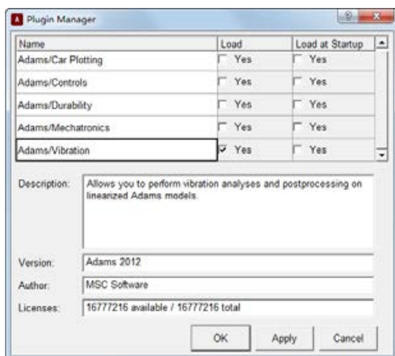


图 10-6　加载 ADAMS/Vibration 模块

10.2 模型仿真

首先验证模型是否能够顺利工作，即太阳能帆板能否顺利展开。在仿真之前先关掉重力的影响。

（1）在 Settings 菜单选择 Gravity 命令，如图 10-7 所示，打开重力对话框。取消 Gravity 复选框选项，如图 10-8 所示。单击 OK 按钮。

（2）在主工具箱中，选择仿真工具，观察无重力影响时的运行过程。在打开的参数设置对话框中设置仿真时间 End time 为 5.0，步数 Steps 为 200，如图 10-9 所示。

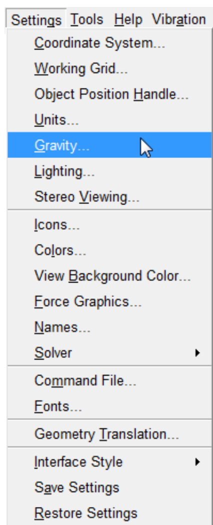


图 10-7　Settings 菜单

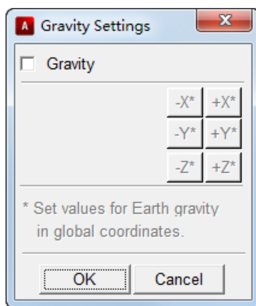


图 10-8　取消重力影响

（3）单击开始仿真按钮，太阳能帆板会逐渐展开，并保持在仿真状态。单击重置按钮，返回初始状态。

（4）选择 Settings 菜单，选择 Gravity 命令，如图 10-7 所示，打开重力对话框。

选中 Gravity 选项，单击-Y 按钮，如图 10-10 所示。单击 OK 按钮。



图 10-9　参数设置

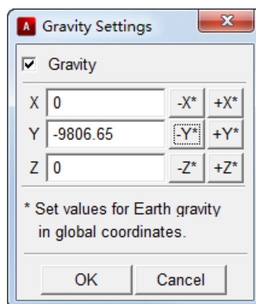


图 10-10　重力选项

10.3 建立输入通道

在负载中心位置处的 x 轴和 y 轴方向建立两个输入通道及其激振器以产生振动，并绘制频率响应曲线。两个激振器对模型产生两个方向相互垂直的指定范围频率内的正弦作用力，x 方向的输入使卫星横向振动，y 方向的输入使卫星纵向振动。

（1）在主菜单选择 Vibration→Build→Input Channel→New，如图 10-11 所示。弹出建立输入通道对话框，如图 10-12 所示。

（2）在 Input Channel Name 栏，输入.satellite.input_x。

（3）在 Input Marker 文本框单击鼠标右键，选取 Marker，再选择 Browse，如图 10-13 所示，弹出数据浏览窗口，如图 10-14 所示。

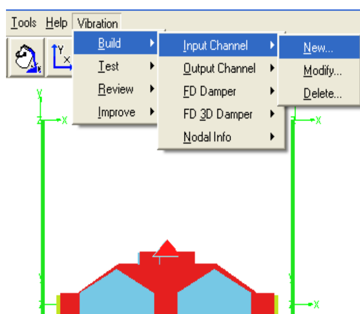


图 10-11　建立输入通道

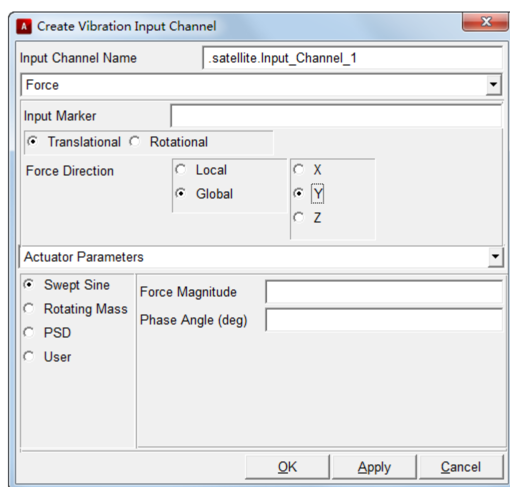


图 10-12　建立输入通道对话框

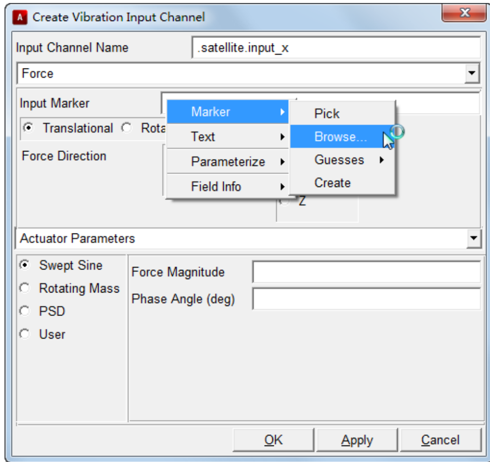


图 10-13　快捷菜单

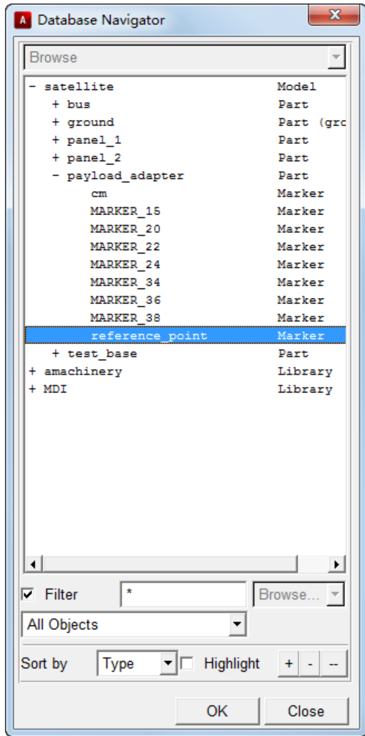


图 10-14　数据浏览窗口

（4）双击 payload_adapter.reference_point，ADAMS/Vibration 在输入标记点文本框中插入该标记点。

（5）在图 10-12 所示对话框中选择 Translational 单选项。Force Direction 选项选择 Global X，添加 x 方向作用力。如图 10-15 所示，在下拉列表框中选择 Actuator Parameters，在单选组中选择 Swept Sine，在 Force Magnitude 栏输入 1，即力的最大振幅为 1，在 Phase Angle（deg）栏输入 0，即相位角为 0。设置完毕单击 Apply 按钮。

（6）ADAMS/Vibration 模块生成 X 向输入通道及其激振器，保留对话框继续建立下一个 y 向的输入通道及激振器。在 Input Channel Name 栏，输入.satellite.input_y。在 Input Marker 文本框输入 payload_adapter.reference_point，设置 Force Direction 为 Global Y，添加 y 方向作用力。选择 Swept Sine 单选项，Force Magnitude 设为 1，Phase Angle（deg）设为 0，如图 10-16 所示。

（7）建立完毕，单击 OK 按钮。至此，ADAMS/Vibration 建立了两个输入通道及其激振器。下面再建立一个运动学输入通道及其激振器。

（8）同上，在主菜单选择 Vibration→Build→Input Channel→New，弹出建立输入通道对话框。

（9）在 Input Channel Name 栏输入.satellite.input_accel_y。设置 Force 为

Kinematic。

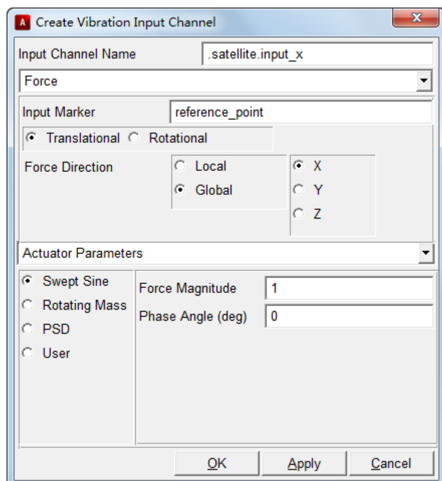


图 10-15　设置 X 向输入通道

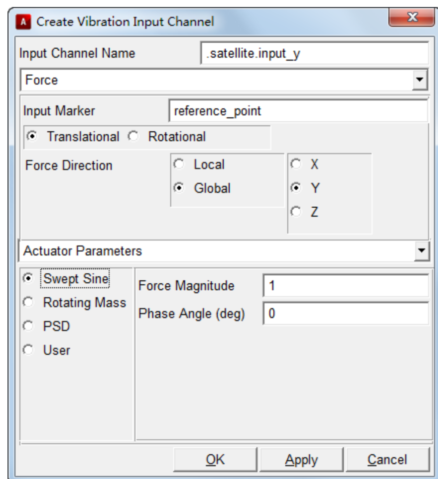


图 10-16　设置 Y 向输入通道

（10）在 Input Marker 文本框单击鼠标右键，选取 Marker→Browse，弹出数据浏览窗口。双击 payload_adapter.reference_point，ADAMS/Vibration 在输入标记点文本框中插入该标记点。如图 10-17 所示。

（11）选中 Global，选中 Translational，选中 Acceleration 和 Y。在 Actuator parameters 项中选择 Swept sine，在 Magnitude 栏中输入 9806.65，在 Phase Angle(deg) 栏中输入 0。确认如图 10-18 所示后，单击 OK 按钮。

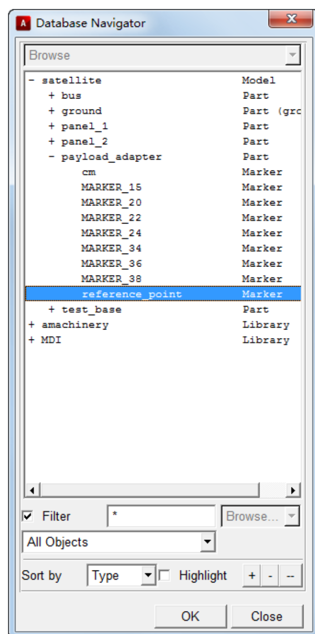


图 10-17　数据浏览窗口

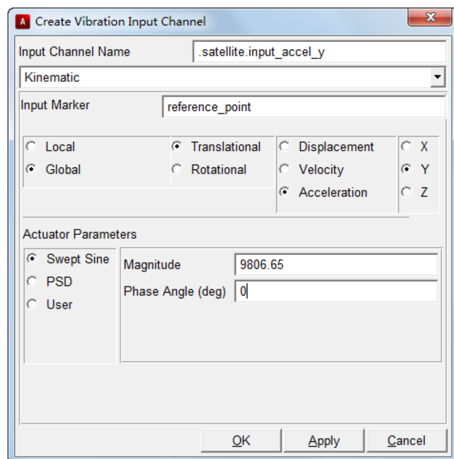


图 10-18　建立运动学输入通道

若要查看建立的激振器，可以进行以下操作：

（1）在主菜单选择 Vibration→Build→Input Channel→Modify，如图 10-19，弹出数据浏览窗口，如图 10-20 所示。

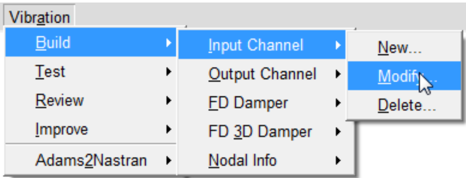


图 10-19 Build 菜单



图 10-20 数据浏览窗口

（2）双击模型名字 satellite 显示出输入通道列表。

（3）双击.satellite.input_accel_y，弹出修改对话框，如图 10-21 所示。在修改对话框中单击 Plot Actuator 按钮，打开激振器预览对话框，如图 10-22 所示。输入以下值：Begin 为 0.1，End 为 100，Steps 为 1000，其他保留默认值。

（4）在激振器预览对话框中单击 Generate Plot 按钮绘制曲线，如图 10-23。

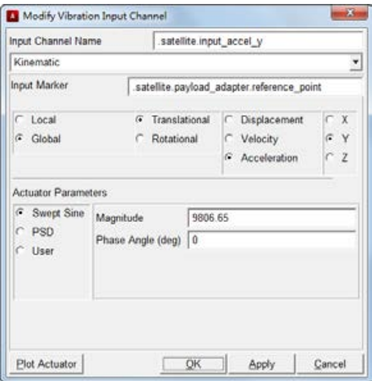


图 10-21 修改对话框

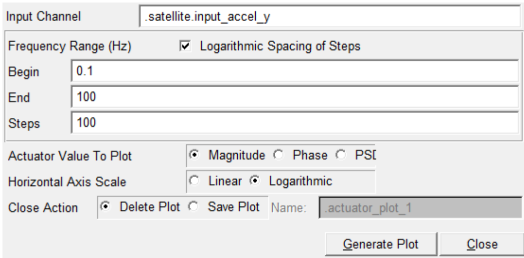


图 10-22 激振器预览对话框

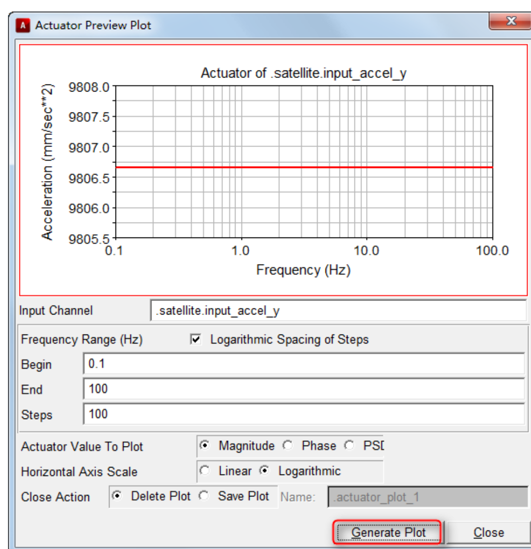


图 10-23　激振器预览图

10.4 建立输出通道

输出通道用以检测系统频率响应，可以在频域直接报告结果。建立输出通道的步骤如下：

（1）在主菜单选择 Vibration→Build→Output Channel→New，如图 10-24 所示，打开新建输出通道对话框，如图 10-25 所示。

（2）在 Output Channel Name 栏输入.satellite.p1_center_x_dis，给输出通道命名。

（3）设置 Output Function Type 为 Predefined，即输出函数类型为预定义类型。

（4）右击 Output Marker 文本框，选标记点 Marker→Browse，弹出数据库浏览窗口。

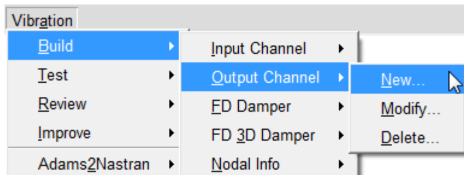


图 10-24　Build 菜单

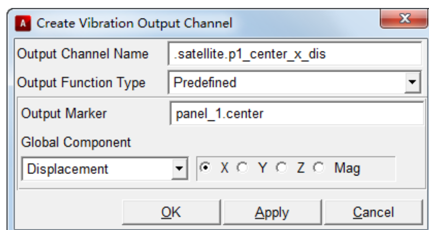


图 10-25　设置输出通道

（5）双击.satellite.panel_1.center 即为输出标志点。

（6）Global Component 设为 X，如图 10-25 所示，设置完毕单击 Apply 按钮。ADAMS/Vibration 建立了一个输出通道。

（7）按以上步骤建立表 10-1 所示的输出通道，所有通道建立完成后单击 OK 按钮。

表 10-1　输出通道

输出通道名字	输出标志点	位移/速度/加速度	方向
satellite.p2_center_x_dis	satellite.panel_2.center	位移	x
satellite.p1_corner_x_dis	satellite.panel_1.corner	位移	x
satellite.p1_corner_x_vel	satellite.panel_1.corner	速度	x
satellite.p1_corner_x_acc	satellite.panel_1.corner	加速度	x
satellite.p1_corner_y_acc	satellite.panel_1.corner	加速度	y
satellite.p1_corner_z_acc	satellite.panel_1.corner	加速度	z
satellite.ref_x_acc	satellite.payload_adapter.cm	加速度	x
satellite.ref_y_acc	satellite.payload_adapter.cm	加速度	y
satellite.ref_z_acc	satellite.payload_adapter.cm	加速度	z

10.5 测试模型

建立了输入/输出通道以后，就可以对模型建立和进行振动分析了。建立和运行受迫振动分析的步骤如下：

（1）主菜单选择 Vibration→Test→Vibration Analysis，如图 10-26 所示，弹出振动分析对话框。

（2）选择 New Vibration Analysis。

（3）输入.satellite.vertical，进行垂直方向的分析。

（4）Operating Point 选择 Assembly，对整体模型进行线性化。

（5）选择 Forced Vibration Analysis，进行受迫振动分析。

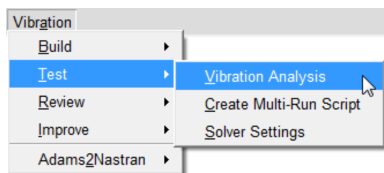


图 10-26　进行振动分析

（6）选择 Damping，按 ADAMS 默认设置添加阻尼。

（7）右键单击 Input Channel，选取 Input_channel→ Guesses→ input_y。

（8）右键单击 Output Channel，选取 Output_channel→ Guesses→*，把所有的输

出通道全部选中。

（9）选择 Logarithmic Spacing of Steps。

（10）设置频率范围 Frequency range（Hz）的起始频率 Begin 为 0.1。

（11）设置终止频率 End 为 1000。

（12）计算步骤 Steps 设为 400。

（13）如果想计算模态能量可以选中 Modal Energy Computation。

（14）设置完成，如图 10-27 所示，单击 OK 按钮。

ADAMS/Vibration 开始进行振动分析，这一过程运行较快。若无错误信息提示，即为正确完成振动分析。

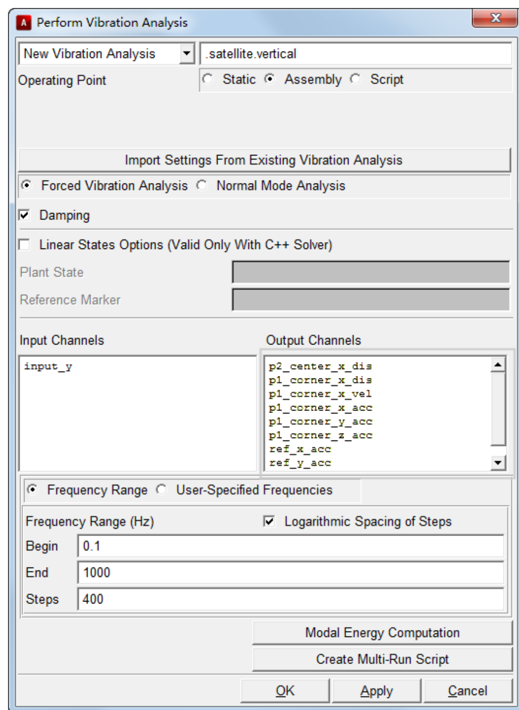


图 10-27　设置振动分析

10.6 验证模型

下面通过 ADAMS/PostPrecessor 对振动分析的数据进行分析。

10.6.1　绘制系统模态

（1）在 Review 菜单选择 PostProcessing Windows，或者直接单击 F8 快捷键。ADAMS/PostProcessing 窗口如图 10-28 所示。

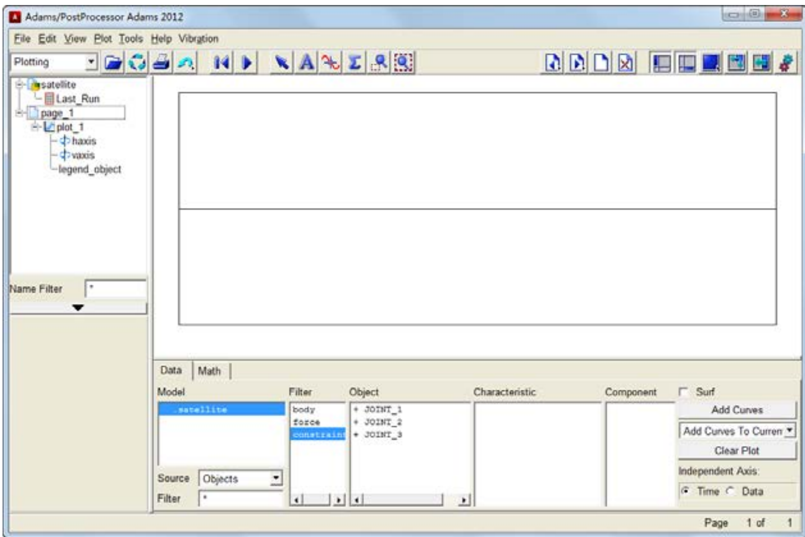


图 10-28　ADAMS/ PostProcessing 窗口

（2）在参数项中，选择 Source 为 System Modes，如图 10-29 所示。

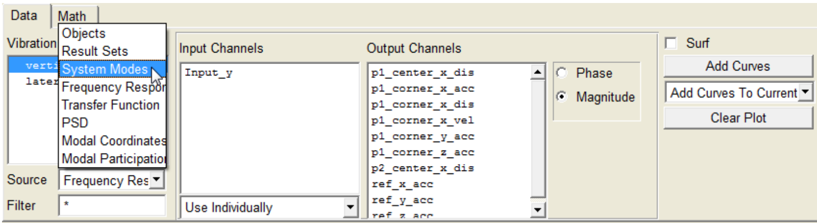


图 10-29　选择参数

（3）simulation 列表中选择 vertical_analsis，Eigen 列表中选择 EIGEN_1，如图 10-30 所示。

（4）单击 Add Scatters 按钮。ADAMS/PostProcessor 窗口绘制系统模态，如图 10-31 所示。

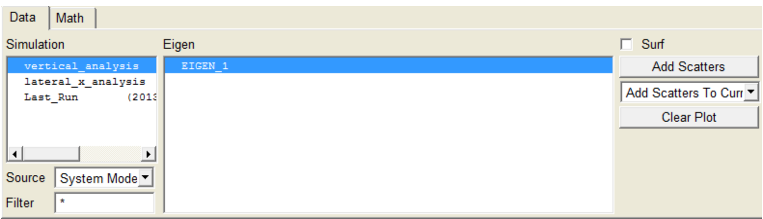


图 10-30　选择参数

（5）在菜单栏下的曲线管理工具按钮中，单击 Plot Tracking 按钮。当光标在各模态标记点上移动时，在绘图区上部显示其实部和虚部及频率值，如图 10-32 所示。

（6）在 Plot 菜单中选择 Create Scatter Plot with Eigen Table，如图 10-33 所示，弹出数据浏览器窗口。选择 Vertical_analysis，再选择 EIGEN_1，如图 10-34 所示。

（7）各模态标记点及其特征值均显示出来，如图 10-35 所示。

（8）选中图 10-35 所示界面，单击 Delete 将其删除，以免影响后面的操作。

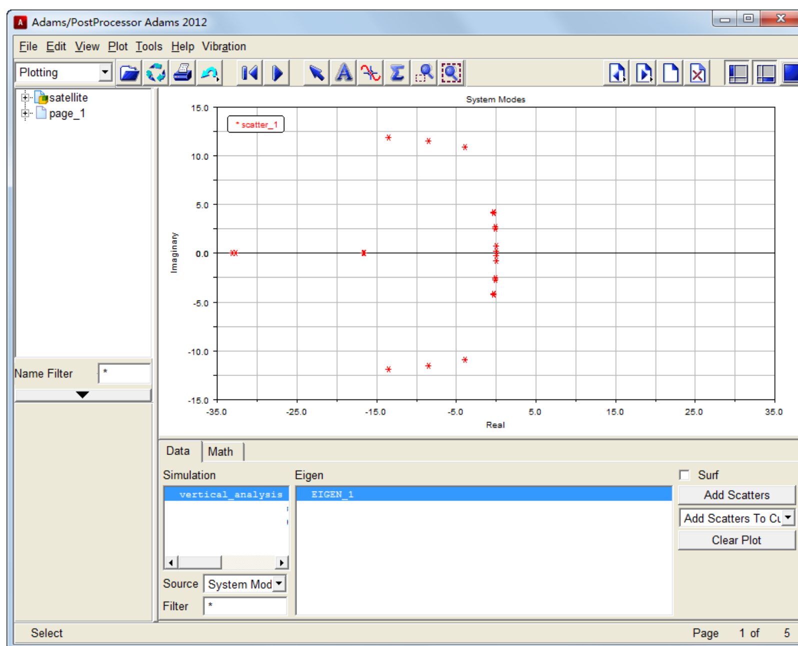


图 10-31　模态图

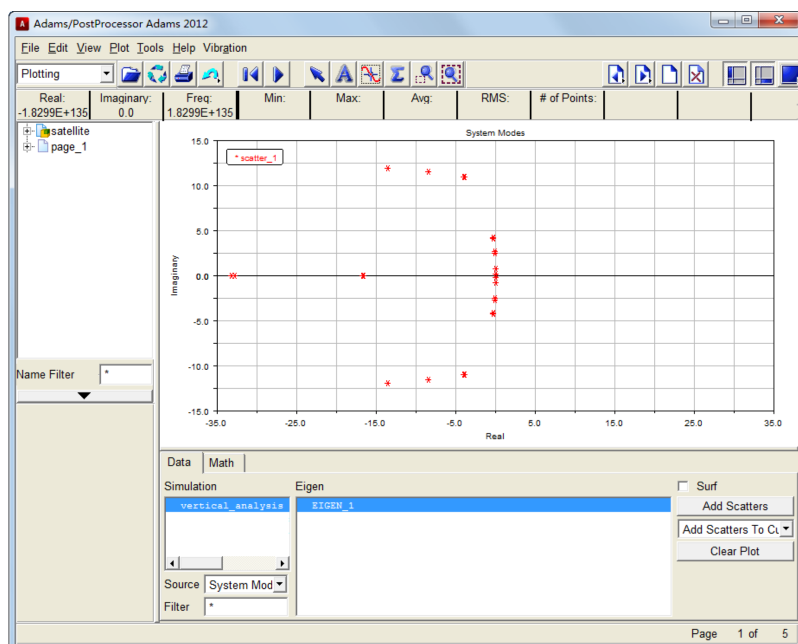


图 10-32　显示具体数值

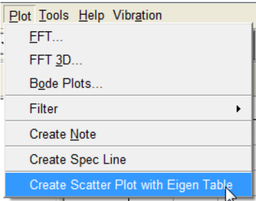


图 10-33　Plot 菜单

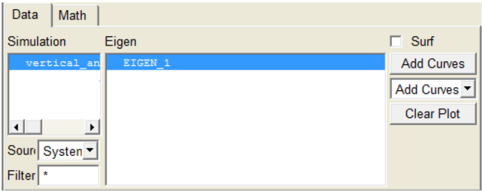
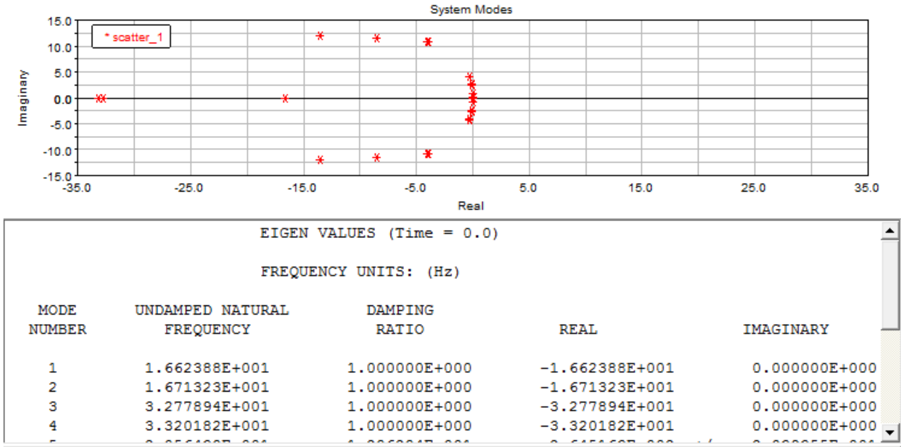


图 10-34　选择参数



EIGEN VALUES (Time = 0.0)

FREQUENCY UNITS: (Hz)

MODE NUMBER	UNDAMPED NATURAL FREQUENCY	DAMPING RATIO	REAL	IMAGINARY
1	1.662388E+001	1.000000E+000	-1.662388E+001	0.000000E+000
2	1.671323E+001	1.000000E+000	-1.671323E+001	0.000000E+000
3	3.277894E+001	1.000000E+000	-3.277894E+001	0.000000E+000
4	3.320182E+001	1.000000E+000	-3.320182E+001	0.000000E+000

图 10-35　模态标记点列表

10.6.2　动画显示固有模态

（1）从File菜单下的选项中选择Animation，如图10-36所示，ADAMS/PostProcessor切换到动画状态。

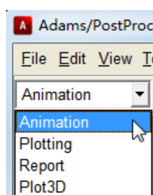
（2）在动画窗口单击鼠标右键，在弹出菜单中选择 Load Vibration Animation，把 Vertical 垂直方向的动画过程显示出来，如图 10-37 所示。

（3）选择 Normal mode animation 复选项，单击窗口下播放按钮可以查看各阶模态。

（4）单击 Table of Eigenvalue 按钮，特征值列表如图 10-38 所示。

前 4 阶模态是过阻尼，其余为欠阻尼。

（5）关闭信息窗口。



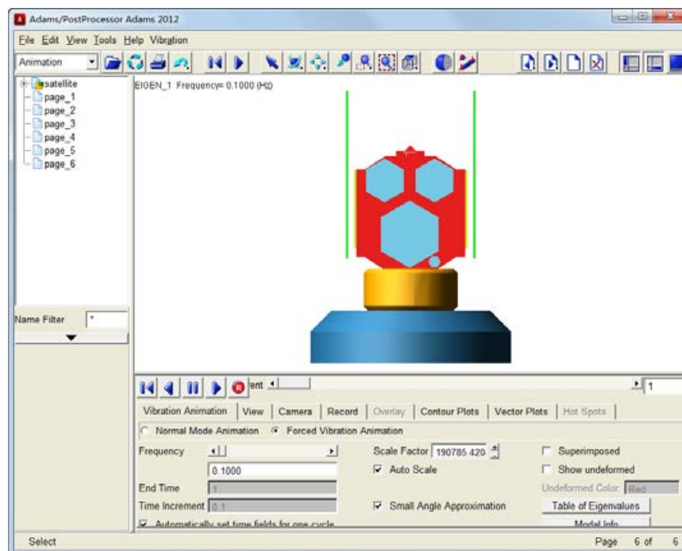


图 10-36　选择选项　　　　　　　　　　　图 10-37　模态动画

Eigen Information

Eigen　satellite.vertical_analysis.EIGEN_1

EIGEN VALUES (Time = 0.000000)

FREQUENCY UNITS: Hz

MODE NUMBER	UNDAMPED NATURAL FREQUENCY	DAMPING RATIO	REAL	IMAGINARY
1	16.6239	1	-16.6239	0
2	16.7132	1	-16.7132	0
3	32.7789	1	-32.7789	0
4	33.2018	1	-33.2018	0
5	0.205644	0.128628	-0.0264516	+/- 0.203935
6	0.206118	0.129593	-0.0267114	+/- 0.20438
7	0.738721	0.0150468	-0.0111154	+/- 0.738638
8	0.764156	0.0180459	-0.0137899	+/- 0.764031
9	2.50764	0.0401214	-0.10061	+/- 2.50562
10	2.70422	0.0429994	-0.11628	+/- 2.70171
11	4.15031	0.0828949	-0.344039	+/- 4.13602
12	4.21914	0.0850201	-0.358711	+/- 4.20386
13	11.6194	0.340359	-3.95477	+/- 10.9257
14	11.6452	0.34401	-4.00608	+/- 10.9345
15	14.3213	0.594212	-8.50989	+/- 11.5187
16	18.0291	0.750243	-13.5262	+/- 11.9201

Highlight Unstable Modes　　File Format　HTML

Unstable Mode Threshold Value　0.0　　Write Table To File

Base Font Size　10　　Close

图 10-38　特征值列表

（6）在 mode number 文本框，利用查看各阶模态，如图 10-39 所示。



图 10-39　mode number 文本框

（7）选择 play 按钮。可以看出第 9 阶和第 15 阶模态振型影响较大。

10.6.3 动画显示受迫振动分析结果

接下来将接近第 9 阶模态 2.5Hz 的激振力下的响应通过动画显示出来。

（1）在图 10-37 所示对话框中选择 Forced Vibration Animation 单选项。在 Frequency 文本框中输入 2.5，如图 10-40 所示。

（2）单击回车键，ADAMS/Vibration 自动选择接近输入值的模态频率 2.5119Hz。选择 Automatically set time fields for one cycle，ADAMS/Vibration 自动设置受迫振动动画的终止时间和运行步数，至少显示一个周期，如图 10-41 所示。

（3）选择 Play 按钮。查看振动响应，卫星的垂直运动是该频率的主要影响。

（4）在 Frequency 文本框中输入 10，如图 10-42 所示，ADAMS/Vibration 自动选择接近输入值的模态频率 10.0000，并把该模态响应放大动画显示。

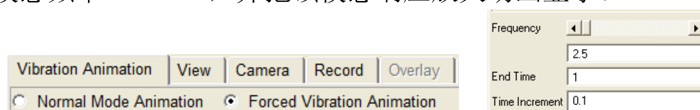


图 10-40 设置参数

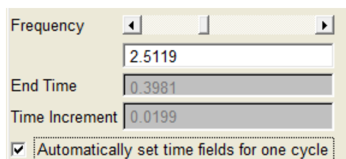


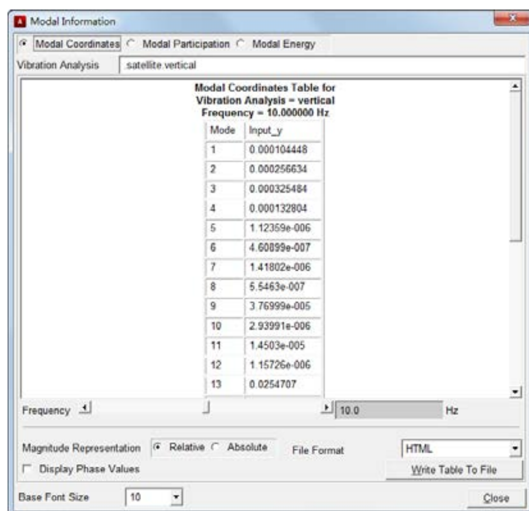
图 10-41 自动选择模态频率



图 10-42 输入新频率

（5）选择 Play 按钮，查看振动响应，然后单击 Pause 按钮。

（6）选择 Modal info 按钮，查看模态信息，如图 10-43 所示。



Modal Coordinates Table for
Vibration Analysis = vertical
Frequency = 10.000000 Hz

Mode	Input_y
1	0.000104448
2	0.000256634
3	0.000325484
4	0.000132804
5	1.12359e-006
6	4.60899e-007
7	1.41802e-006
8	5.5463e-007
9	3.76999e-005
10	2.93991e-006
11	1.4503e-005
12	1.15726e-006
13	0.0254707

图 10-43 模态列表

（7）选择对话框中 Modal participation 单选项，显示每个输出通道中各阶影响，如图 10-44 所示。

（8）选择 Model Energy，显示选择的相应阶模态能量。

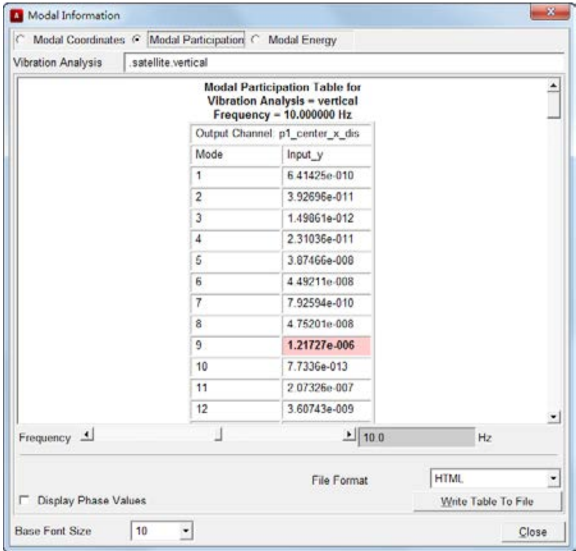


图 10-44　显示各阶影响

10.6.4　绘制频率响应

（1）在 File 菜单下方的选项中选择 Plotting，如图 10-45 所示。此时会弹出警告窗口，提醒动画将被删除，如图 10-46 所示。单击 OK。ADAMS/PostProcessor 切换到绘图模式。

（2）右击 Page layout 按钮，如图 10-47 所示。

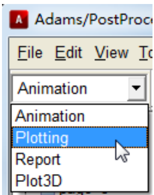


图 10-45　选择选项

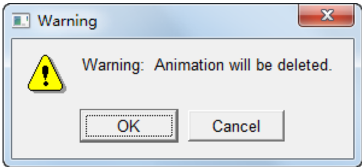


图 10-46　提示框

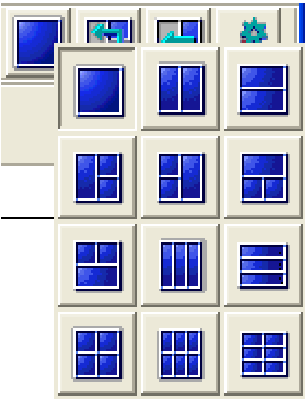


图 10-47　单击按钮

（3）在系统打开的 ADAMS/PostProcessor 下方对话框中，设置 Source 为 Frequency

Response。在 Vibration Analysis 列表中选择 Vertical。在 Input Channels 列表中选择 Input_y。在 Output Channels 列表中选择 p1_corner_y_acc。选择 Magnitude，即绘制响应幅值。选择 Add Curves，添加响应曲线，如图 10-48 所示。

（4）在 output channels 列表中选择 ref_y_acc。

（5）选择 Add Curves，ADAMS/PostProcessor 绘制频率响应幅值，如图 10-49 所示。

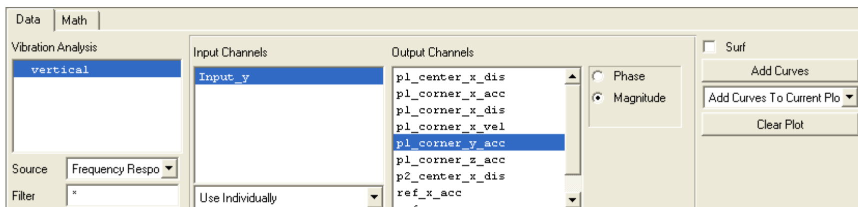


图 10-48　设置参数

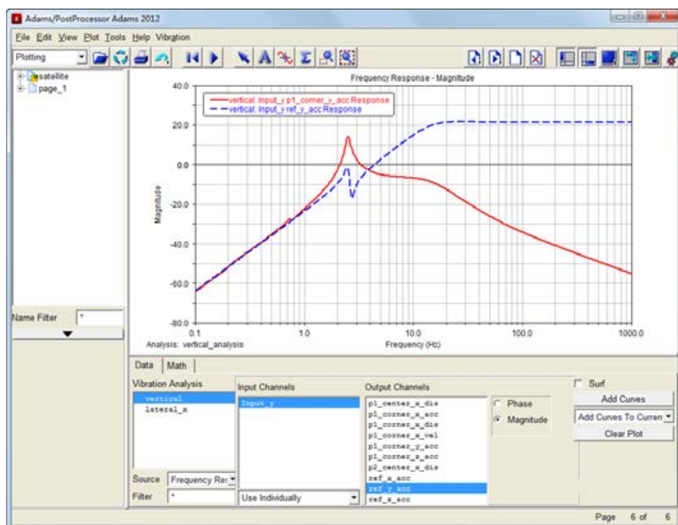


图 10-49　频率响应幅值

如果想在同一页面上分上下两页同时显示幅值和相位，在 Page layout 按钮上单击鼠标右键，选择 2-Views 按钮。视图区会分为幅值和相位图，如图 10-50 所示。

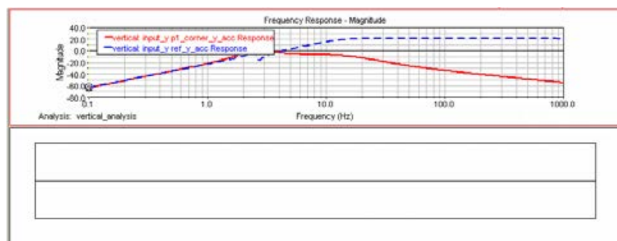


图 10-50　幅值和相位图

绘制频率相位图步骤如下：

1）单击新分出的相位空白绘图区。

2）Source 设为 Frequency response。

3）在 Vibration Analysis 列表中选择 vertical。

4）在 Input Channels 列表中选择 Input_y。

5）在 Output Channels 列表中选择 p1_corner_y_acc。

6）选择 Phase，即绘制响应相位。

7）选择 Add Curves，如图 10-51 所示。

8）在 Output Channels 列表中选择 ref_y_acc。

9）选择 Add Curves，如图 10-52 所示。

ADAMS/PostProcessor 绘制频率响应相位曲线图，如图 10-53 所示。

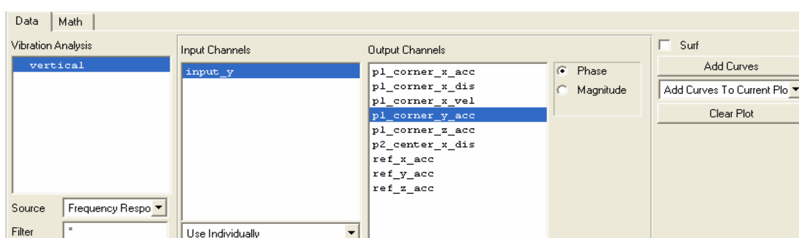


图 10-51　设置参数

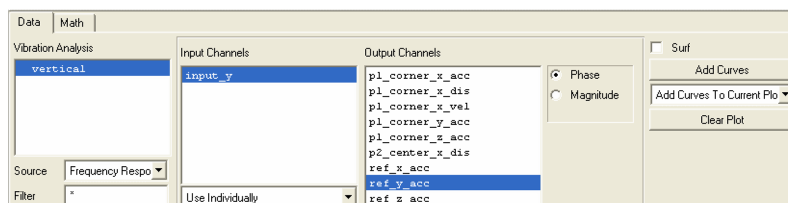


图 10-52　设置参数

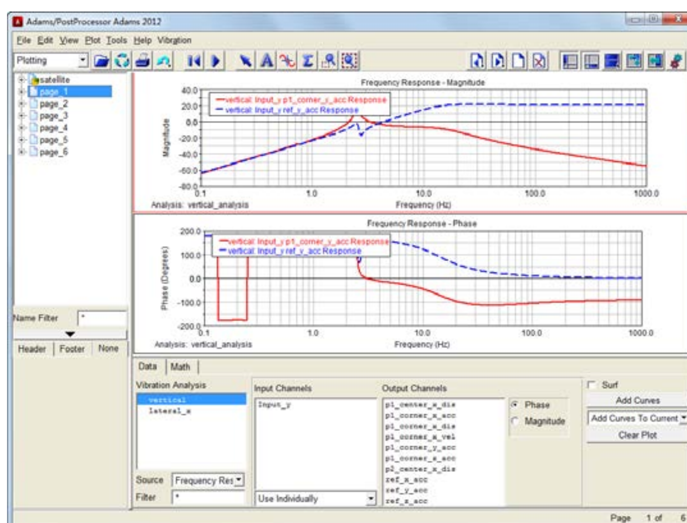


图 10-53　频率响应图

从图中可以看出影响垂直加速度响应最大的两个模态频率为 2.5Hz 和 10Hz 附近。

10.6.5　绘制功率谱密度

通过绘制功率谱密度或 PSD，可以显示振动分析中各种输入的传递能量。

（1）选择 ADAMS/PostProcessor 界面上 New page 按钮。

（2）在 Page layout 按钮上单击鼠标右键，选择 page layout：1View 按钮。

（3）Source 设为 PSD。在 Vibration Analysis 列表中选择 vertical。在 Output channels 列表中选择 p1_corner_y_acc。选择 Add Curves，如图 10-54 所示。

（4）在 Output Channels 列表中选择 p1_corner_y_acc。单击横坐标轴，在 Format 下的 Scale 选项中选取 dB，如图 10-55 所示。

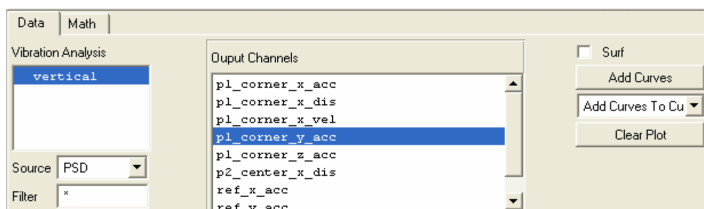


图 10-54　设置参数

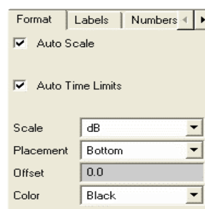


图 10-55　设置参数

ADAMS/PostProcessor 绘制功率谱曲线图，如图 10-56 所示。

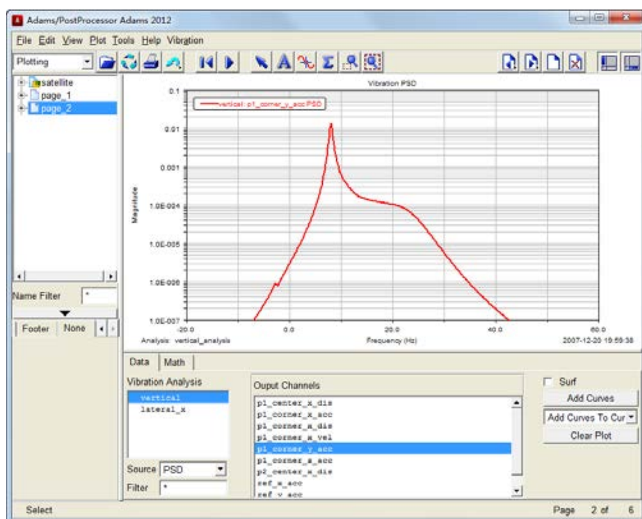


图 10-56　功率谱曲线

10.6.6　绘制模态坐标

绘制模态坐标可以发现对系统振动响应影响最大的模态，步骤如下：

（1）选择 New page 按钮[icon]。

（2)Source 设为 Modal coordinates。在 Vibration analysis 列表中选择 vertical。在 input channels 列表中选择 input_y。Modal coordinates by 设为 Mode。Mode 设为 9。选择 Add Curves。ADAMS/PostProcessor 绘制第 9 阶模态坐标图，如图 10-57 所示。

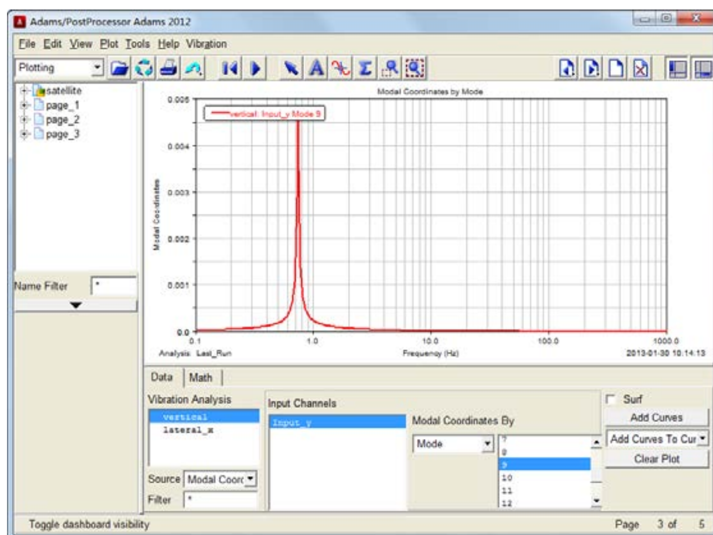


图 10-57　第 9 阶模态坐标图

（3）Mode 设为 15。选择 Add Curves。ADAMS/PostProcessor 绘制第 15 阶模态坐标图，如图 10-58 所示。

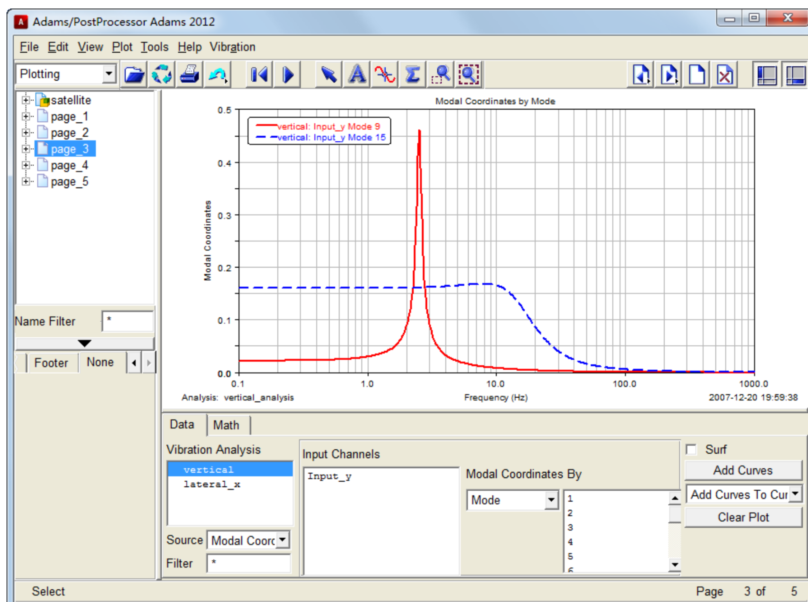


图 10-58　第 15 阶模态坐标图

10.7 精化模型

下面对模型的横向振动响应进行分析，查看影响横向振动最大的模态，并绘制频响函数。

10.7.1　受迫振动分析

（1）在 ADAMS/PostProcessor 工具箱中单击 ADAMS/View 按钮，返回建模环境。

（2）在主菜单选择 Vibration→Test →Vibration Analysis，如图 10-59 所示。

（3）系统打开受迫振动分析对话框，如图 10-60 所示。选择 New Vibra tion Analysis 下拉选项。命名为 lateral_x。Operating Point 选项选择 Assembly。选择 Forced Vibration Analysis 单选项。Damping 设为 on，打开默认阻尼。

（4）在 Input Channels 中单击鼠标右键，选择 Input_channel→Guesses→ Input_x.

（5）在 Output Channels 中单击鼠标右键，选择 Output_channel→ Guesses→选择*，选中所有输出通道。

（6）选择 Logarithmic Spacing of Steps 复选项。在 Frequency Range （Hz）中，在 Begin 中输入 0.1。End 中输入 1000。Steps 中输入 400，如图 10-60 所示。设置完毕单击 OK 按钮，ADAMS/Vibration 进行受迫振动分析。

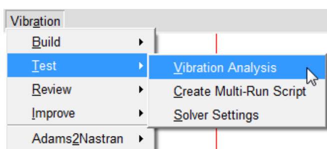


图 10-59　Simulate 菜单

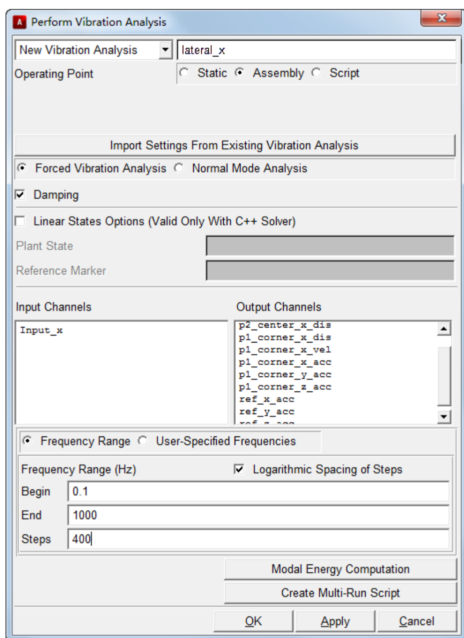


图 10-60　受迫振动分析

10.7.2　动画显示固有模态

（1）在 Review 菜单选择 PostProcessing windows 或者单击 F8 快捷键。

（2）在打开的界面上选择 New page 按钮。

（3）在 File 菜单下的选项中选择 Animation，如图 10-61 所示。

（4）在动画窗口单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择 Load Vibration Animation，如图 10-62 所示。

（5）在打开的浏览窗口中选择 lateral_x，如图 10-63 所示。系统返回到 ADAMS/Post Processor 界面，选择 Normal mode animation 单选项。在 Mode number 文本框，利用查看各阶模态。

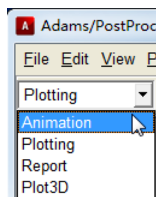


图 10-61　选择选项

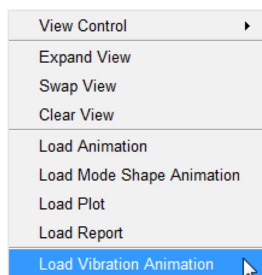


图 10-62　快捷菜单

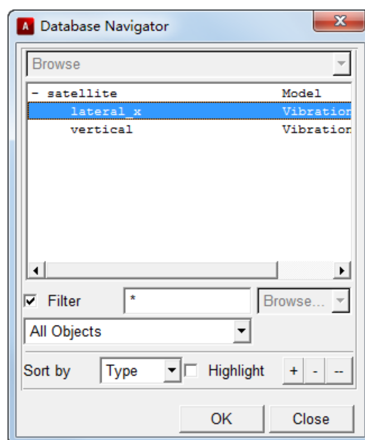


图 10-63　浏览窗口

（6）选择 Play 按钮，查看第 8、11 和 14 阶模态振形，如图 10-64 所示。

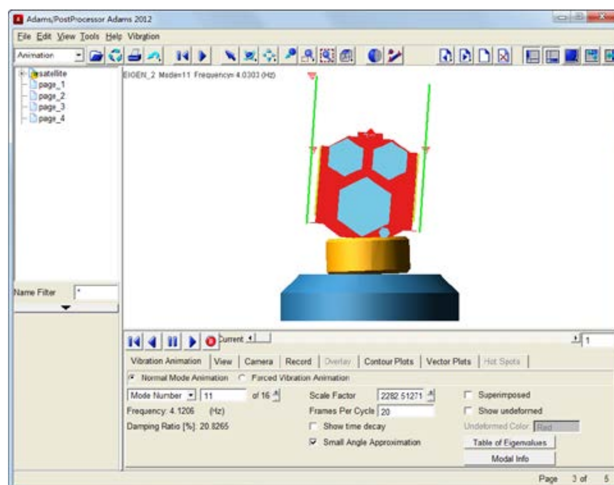


图 10-64　模态振型

10.7.3　绘制受迫振动频率响应

（1）在 File 菜单下方的选项中选择 Plotting，如图 10-65 所示。此时会弹出警告窗口，提醒动画将被删除，如图 10-66 所示。单击 OK 按钮，ADAMS/PostProcessor 切换到绘图模式。

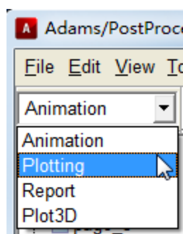


图 10-65　选择选项

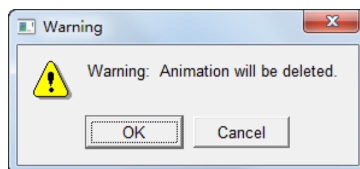


图 10-66　提示框

（2）单击 New page 按钮。

（3）在打开的对话框中将 Source 设置为 Frequency response。在 Vibration analysis 列表中选择 lateral_x。在 input channels 列表中选择 input_x。在 output channels 列表中选择 p1_corner_x_acc。选择 Magnitude 单选项。单击 Add Curves 按钮，显示如图 10-67 所示。

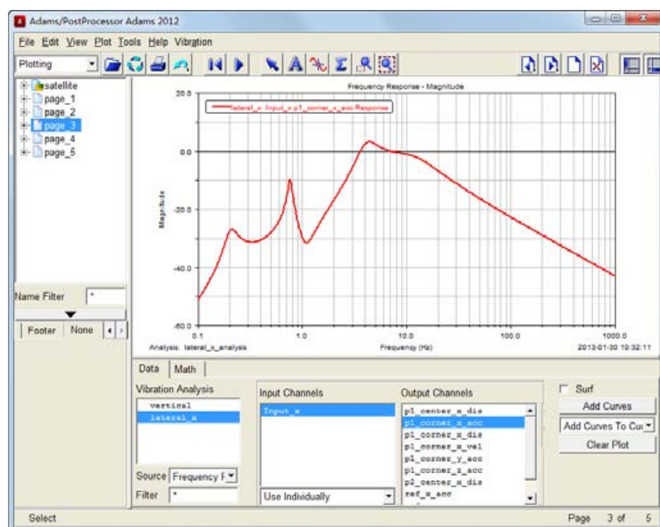


图 10-67　响应曲线

（4）在 output channels 列表中选择 ref_x_acc。单击 Add Curves 按钮，ADAMS/PostProcessor 绘制频率响应幅值，如图 10-68 所示。

绘制三维频响图步骤如下：

1）在 File 菜单下的下拉菜单中，选择 Plot_3D。

2）在Vibration Analysis对话框中，选择所有分析包括vertical和lateral_x。在 Input Channels 下拉选项中选择 Sum all input channels。设置 Output Channels 为p1_corner_x_acc。选择Add Curves添加图形。绘制曲线如图10-69所示。

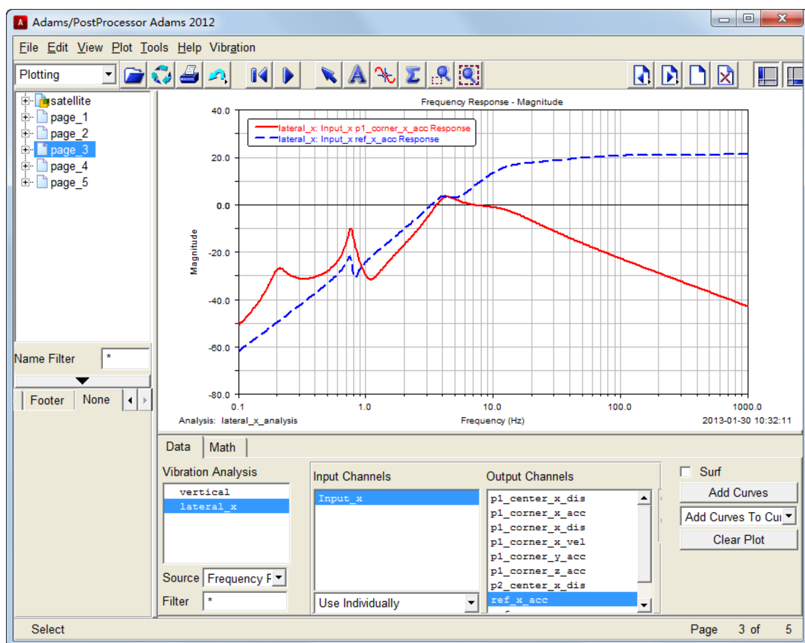


图10-68　频响曲线

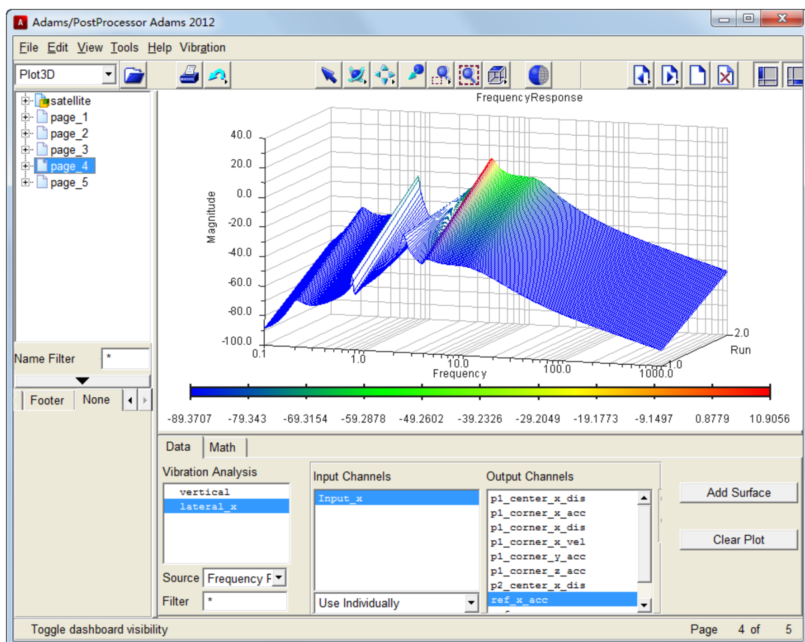


图10-69　三维频响图

10.8 优化模型

下面通过修改设计变量来确定对于给定的频率范围内最大可能降低噪声的阻尼值。

10.8.1 1%的总阻尼

首先修改设计变量 trans_damp。

（1）单击 ADAMS/View 按钮返回建模模式。

（2）在 Build 菜单，选择 Design Variable→Modify，如图 10-70 所示。

（3）在打开的浏览窗口中选择 trans_damp 阻尼变量，如图 10-71 所示。单击 OK 按钮。

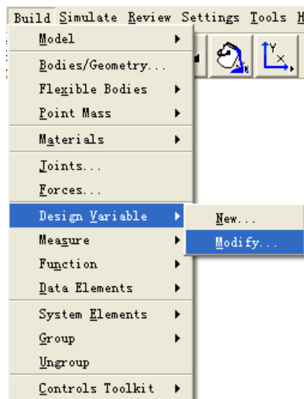


图 10-70 Build 菜单

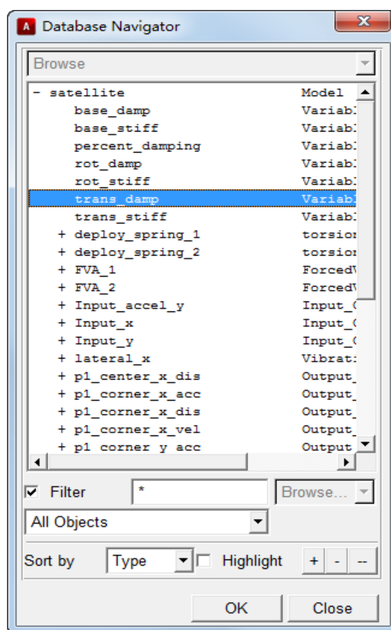


图 10-71 浏览窗口

（4）在变量设计对话框中，确认出现（trans_stiff*0.33*1.0E-002），如图 10-72 所示。

（5）单击 OK 按钮。

下面进行振动分析。

（1）在主菜单选择 Vibration→Test→Vibration Analysis。

（2）在打开的对话框中选择 Vibration Analysis 下拉选项，在后面的文本框中输入 lateral_x，单击 OK 按钮，如图 10-73 所示。

（3)在 Review 菜单选择 PostProcessing Windows，或者直接单击 F8，切换到 ADAMS/PostProcessing 窗口，显示振动分析结果如图 10-74 所示。

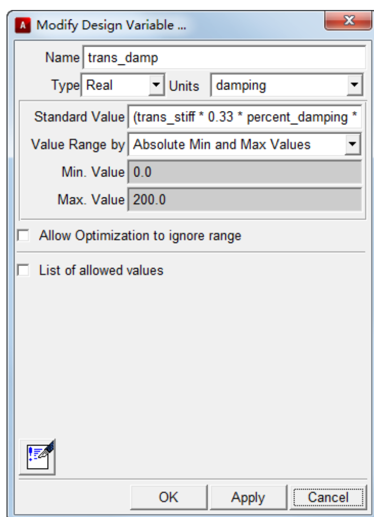


图 10-72 变量设计对话框

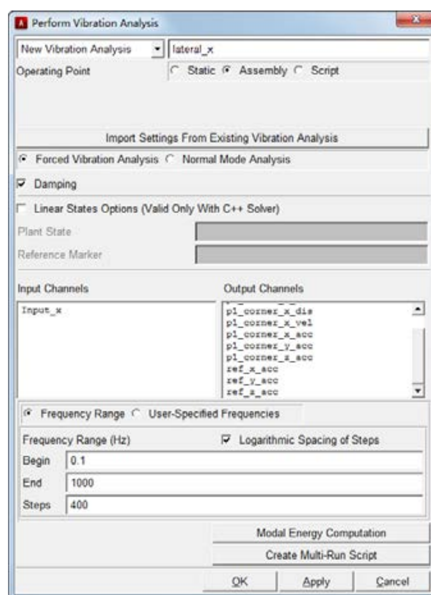


图 10-73 振动分析

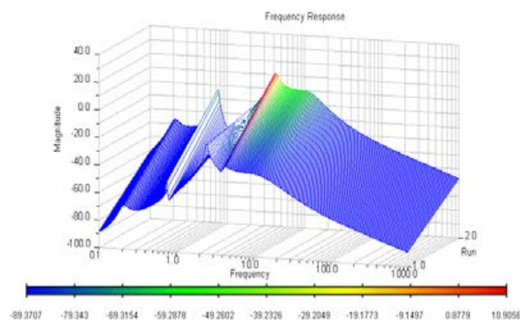


图 10-74 振动分析结果

绘制频响曲线步骤如下：

1）运行 ADAMS/PostProcessor。

2）单击 New page 按钮，并在 File 菜单下方的选项中选择 Plotting。

3）在 Data 选项卡中将 Source 设为 Frequency response。在 Vibration analysis 列表中选择 lateral_x。在 input channels 列表中选择 input_x。在 output channels 列表中选择 pl_corner_x_acc。选择 Magnitude。单击 Add Curves 按钮。ADAMS/PostProcessor 绘制频率响应幅值，如图 10-75 所示。

若要修改标记文字，步骤如下：

（1）鼠标选中曲线，在属性编辑窗口显示标记文字，如图 10-76 所示。

（2）在对话框左下角 Legend 项文本框中输入 1% damping，如图 10-77 所示，移走鼠标后对曲线标记的修改即可生效。

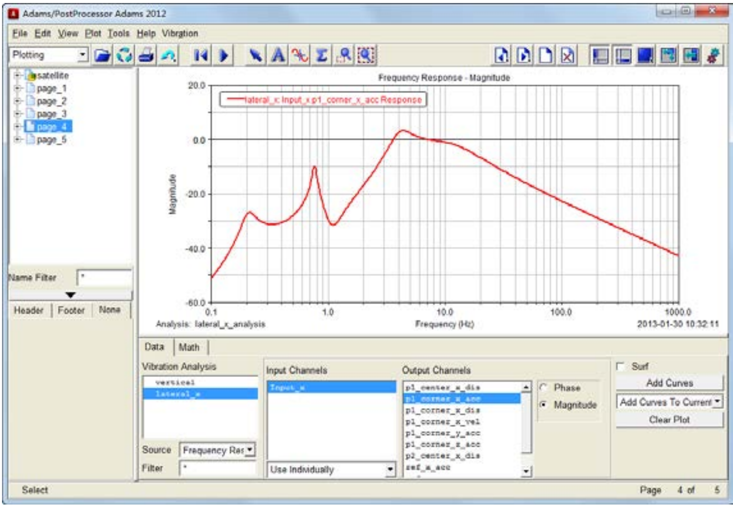


图 10-75　频率响应幅值

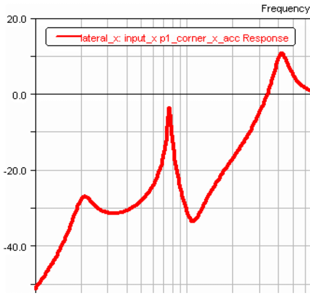


图 10-76　选择文字

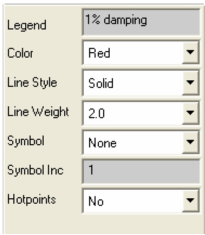


图 10-77　修改文字

10.8.2　2%，3%，4%，5%的总阻尼

按表 10-2 依次把阻尼设计变量改为 2%，3%，4%和 5%，并进行振动分析，绘制频率响应曲线。

表 10-2　不同阻尼值

阻尼	公式
2%	trans_stiff＊0.33＊percent_damping＊2.0E-002
3%	trans_stiff＊0.33＊percent_damping＊3.0E-002
4%	trans_stiff＊0.33＊percent_damping＊4.0E-002
5%	trans_stiff＊0.33＊percent_damping＊5.0E-002

以 2%阻尼为例，重新修改阻尼设计变量 trans_damp。

（1）单击 ADAMS/View 按钮返回建模模式。

（2）在 Build 菜单，选择 Design Variable→Modify，在打开的浏览窗口中选择 trans_damp 阻尼变量，如图 10-78 所示。单击 OK 按钮。

（3）在打开的变量设计对话框中，将（trans_stiff * 0.33 * percent_damping * 1.0E-002）改为（trans_stiff * 0.33 * percent_damping * 2.0E-002），如图 10-79 所示，阻尼扩大为原来的两倍。

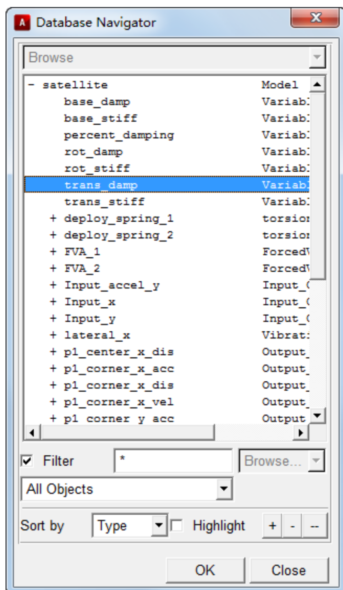


图 10-78　浏览窗口

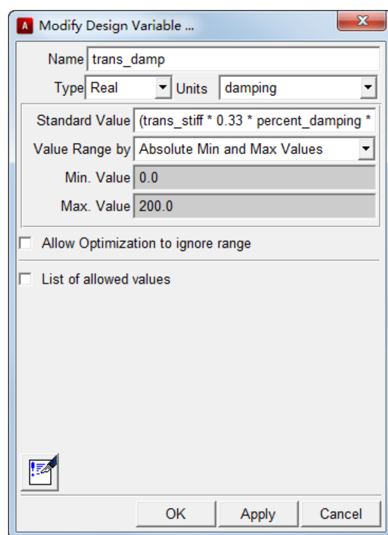


图 10-79　设计变量修改对话框

（4）单击 OK 按钮。

（5）在主菜单选择 Vibration→Test→Vibration Analysis。

（6）在打开的对话框中选择 Vibration Analysis 下拉选项，确认后面的文本框中为 lateral_x，单击 OK 按钮开始振动分析。

（7）进入 ADAMS/PostProcessor，添加阻尼修改为 2%后的频率响应曲线。



注意

- 在首次修改阻尼设计变量后，也可以单击 Apply，而不单击 OK，这样每次从 PostProcessor 界面返回建模界面就可以直接修改阻尼值。
- 阻尼设计变量修改完成以后，需要重新进行振动分析，否则显示的曲线仍为修改之前的仿真结果。

依照上述方法分别添加阻尼设计变量为 2%，3%，4%和 5%时的频率响应曲线，并依次

修改曲线标记，最终结果如图 10-80 所示。

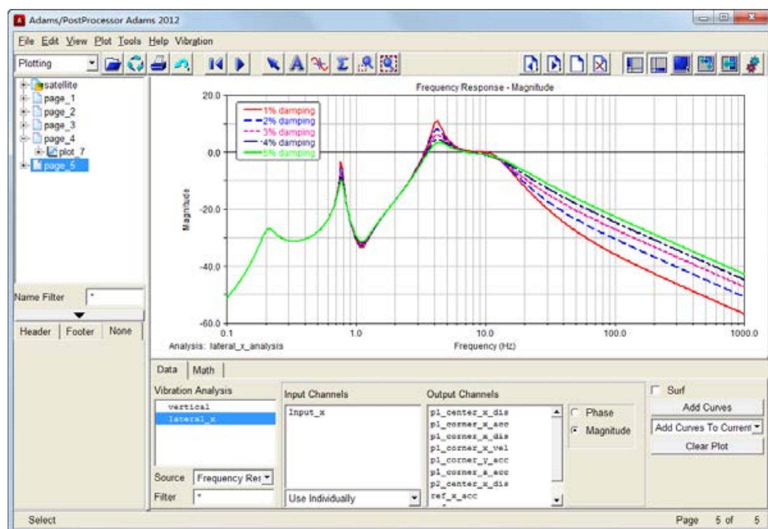


图 10-80　不同阻尼值频响曲线

第 11 章

控制仿真

ADAMS 提供了两种对机电一体化系统进行控制仿真分析的方法。一种是利用 ADAMS/View 提供的控制工具箱，它提供了简单的线性控制模块和滤波模块，可以方便地实现前置滤波、PID 控制和其他连续时间单元的模拟仿真。另一种方法是使用 ADAMS/Controls 模块进行控制仿真分析。

学 习 要 点

- ADAMS/Controls 设计流程
- ADAMS/Controls 应用实例
- ADAMS/Controls 和 MATLAB 集成建模

11.1 ADAMS/Controls 设计流程

通过 ADAMS/Controls 模块在 ADAMS 模型中添加控制系统，可以实现添加复杂的控制系统并进行过程仿真、直接从 ADAMS 数据中建立机械系统仿真模型、分析仿真结果等。

在模型的设计过程中，机械设计师和控制设计师虽然采取不同的方法和工具，但目标是一致的。在使用 ADAMS/Controls 之前，机械设计师和控制设计师各自进行不同的设计验证和实验，制造虚拟样机，出现问题后各自重新设计，如图 11-1 所示。

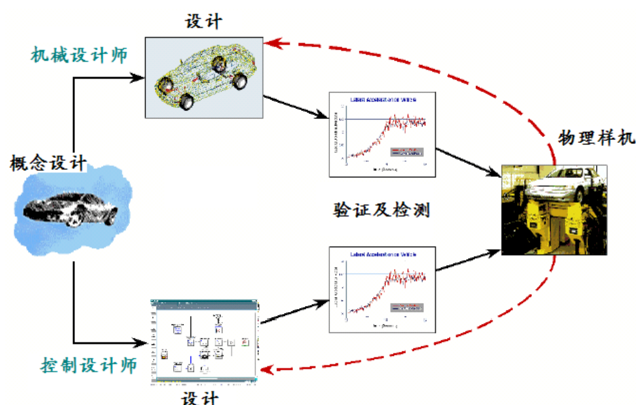


图 11-1　使用 Controls 模块以前的设计

使用 ADAMS/Controls 模块以后，机械设计师和控制设计师可以共享一个虚拟样机，进行同样的设计验证和测试，两者协调一致，既节省时间又增加了可靠性，设计过程如图 11-2 所示。

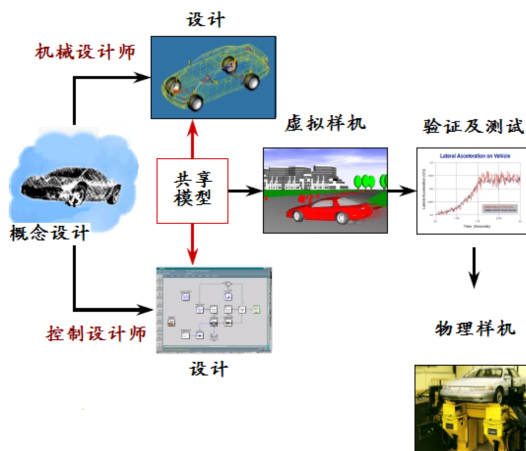


图 11-2　使用 Controls 模块以后的设计

ADAMS/Controls 控制系统有两种使用方式：

- 交互式：在 ADAMS/Car、ADAMS/Chassis、ADAMS/Rail、ADAMS/View 等模块中添加 ADAMS/Controls，通过运动仿真查看控制系统和模型结构变化效果。
- 批处理式：为了获得更快的仿真结果，直接利用 ADAMS/Solver 这个强有力的分析工具运行 ADAMS/Controls。

设计 ADAMS/Controls 控制系统主要分为 4 个步骤：

（1）建模：机械系统模型即可以在 ADAMS/Controls 下直接建立，也可以从外部输入已经建好的模型。模型要完整包括所需的所有几何条件、约束、力以及测量等。

（2）确定输入输出：确定 ADAMS 的输入输出变量，可以在 ADAMS 和控制软件之间形成闭环回路，如图 11-3 所示。

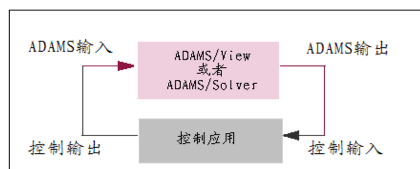


图 11-3　输入输出变量

（3）建立控制模型：通过一些控制软件如 MATLAB、Easy5 或者 Matrix 等建立控制系统模型，并将其与 ADAMS 机械系统连接起来。

（4）仿真模型：使用交互式或批处理式仿真机械系统与控制系统连接在一起的模型。

通过 ADAMS/Controls 控制系统构建的计算机仿真系统模型如图 11-4 所示。

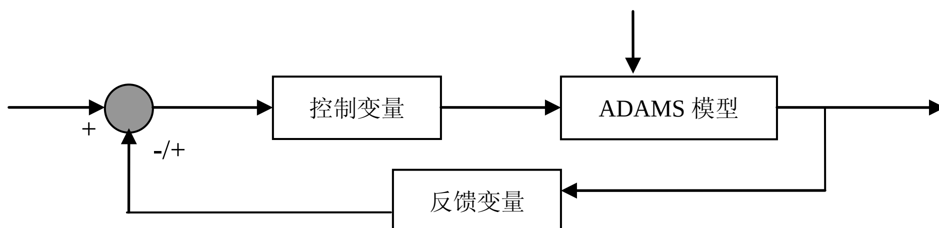


图 11-4　计算机仿真系统

11.2 ADAMS/Controls 应用实例

接下来通过如图 11-5 所示的天线雷达模型，说明 ADAMS/Controls 控制系统的应用方法。天线通过旋转副约束与高位轴承连接，高位轴承通过固定副约束与支撑杆连接，天线支撑杆通过固定副约束与圆盘连接，圆盘通过旋转副约束与大地连接，减速齿轮通过旋转副约束与大地连接，定位马达通过旋转副约束与大地连接。

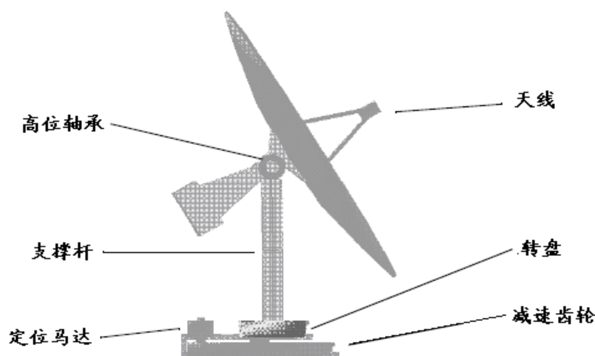


图 11-5　天线模型

11.2.1　导入天线模型

（1）通过“开始”→“所有程序”运行 Adams-View 2012，或直接双击桌面上的快捷方式 Adams – View 2012，运行 ADAMS 2012。

（2）在欢迎对话框中选择 Existing Model，如图 11-6 所示。

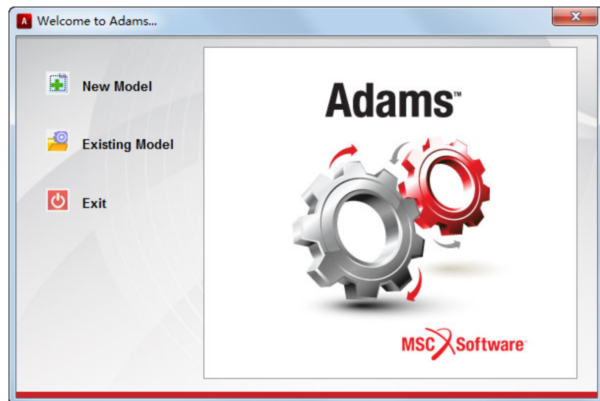


图 11-6　开始界面

（3）在打开的选择文件对话框中，在 File Name 栏内单击鼠标右键，选择 Browse，如图 11-7。选择 ADAMS 的安装目录下的/controls/examples /antenna 目录选择 antenna.cmd 文件。选择完毕的对话框如图 11-8 所示。单击 OK 按钮。

（4）在 Setting 菜单中选择 View Background Color 命令，如图 11-9 所示，ADAMS/View 将显示一个背景颜色选择对话框，自定义背景颜色为白色，如图 11-10 所示，单击 OK 按钮。

（5）模型载入完毕后，选择主工具箱中，再选择 Render 按钮 Render，模型从线框模式显示转换为三维形状，如图 11-11 所示。

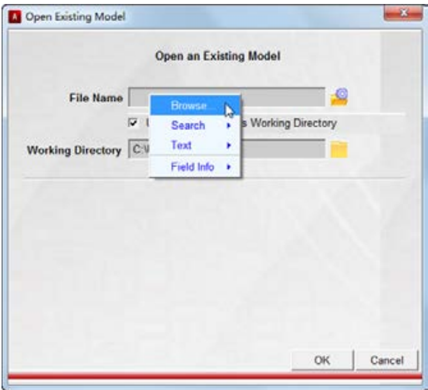
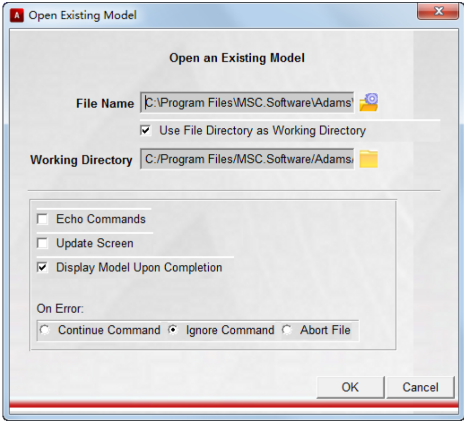


图 11-7 导入文件对话框



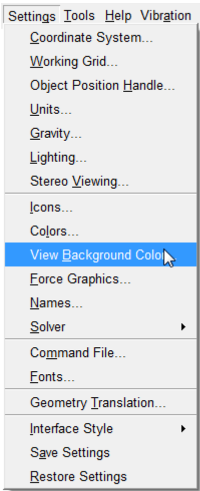
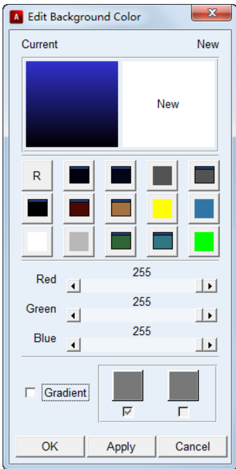


图 11-8 导入文件最终对话框　　　　　　图 11-9 Setting 菜单框



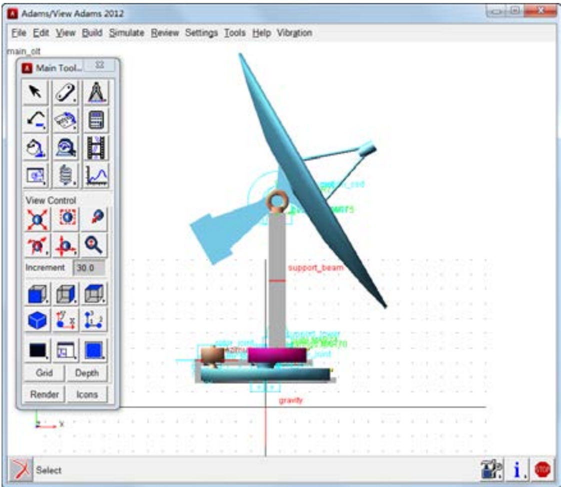


图 11-10 背景颜色设置对话框　　　　　　图 11-11 天线模型

11.2.2 加载 ADAMS/Controls 模块

（1）选择 Tools 菜单下的 Plugin Manager 命令，如图 11-12 所示。

（2）在弹出的插件配置对话框中 Controls 右侧的 Load 选中 Yes，如图 11-13 所示。

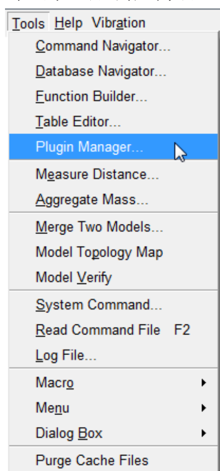


图 11-12 Tools 菜单

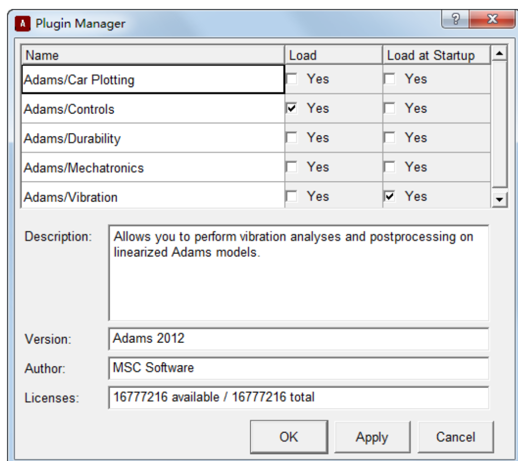


图 11-13 添加 controls 插件

（3）单击 OK 按钮。添加了 ADAMS/Controls 插件后，在 ADAMS 主菜单多了 Controls 项，如图 11-14 所示。

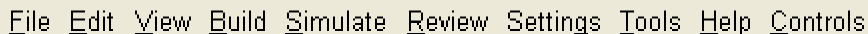


图 11-14 主菜单栏

11.2.3 运行实验仿真

（1）选择 Simulate 菜单下的 Interactive Controls 命令，如图 11-15 所示。

（2）在仿真对话框中输入 End time 为 0.5，Steps 为 250，选择 Start at equilibrium，如图 11-16 所示。

（3）设置完毕，单击▶按钮开始仿真，天线模型在旋转的同时上下摆动。

11.2.4 取消驱动

在验证模型无误后，准备添加控制系统之前，要取消模型的一些定位运动，然后再添加控制力矩。

（1）选择 Edit 下的 Deactive，如图 11-17 所示。弹出 Database Navigator 对话框，如图 11-18 所示。

（2）双击选项 main_olt。系统打开图 11-19 所示的 Database Navigator 对话框，

在下面的部件和运动列表中选择 azimuth_motion_csd。单击 OK 按钮，取消该运动。

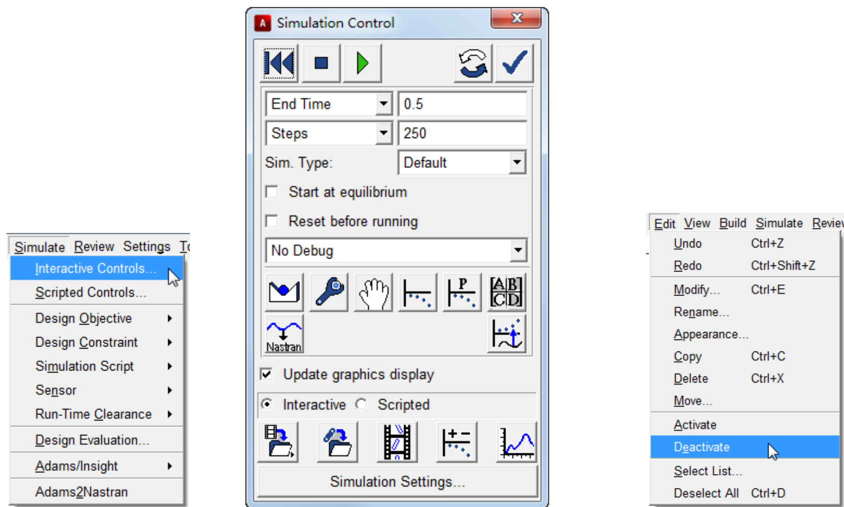


图 11-15　Simulate 菜单　　　图 11-16　仿真设置　　　图 11-17　Edit 菜单

（3）重复 11.2.3 节步骤 1、2，使仿真界面返回至开始状态。

（4）各参数设置不变，重新开始仿真。观察天线的运动情况，天线只会上下摆动，没有了旋转运动。

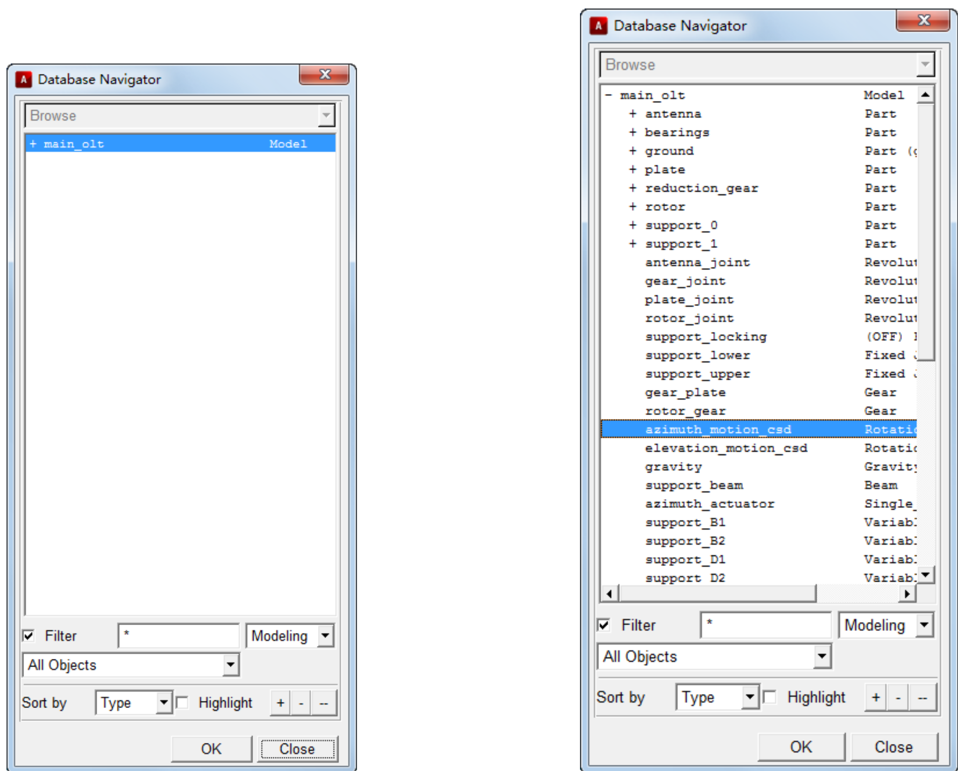


图 11-18　Database Navigator 对话框　　　图 11-19　选择选项

11.2.5 核实输入变量

（1）选择 Build 菜单中的 System Elements→State Variable→Modify，如图 11-20 所示。

（2）在打开的 Database Navigator 对话框中双击 main_olt。

（3）在打开的 Database Navigator 对话框选择 control_torque，如图 11-21 所示。

（4）选择 OK 按钮，弹出修改变量对话框，如图 11-22 所示。

（5）在 F（Time）一栏中的值为 0.0，在后面的控制过程中，控制力矩将获取新数值。

（6）单击 Cancel 按钮关闭该对话框。

（7）选择 Edit 菜单中的 Modify 命令，如图 11-23 所示。

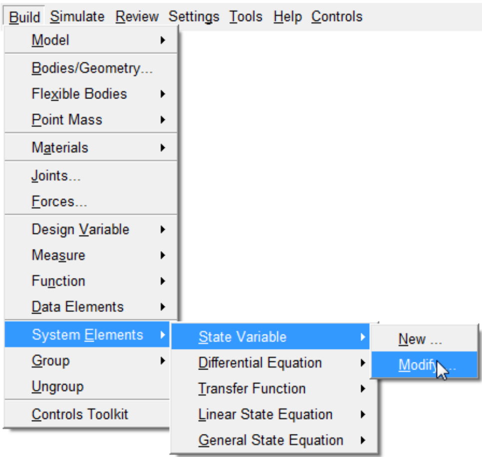


图 11-20 Build 菜单

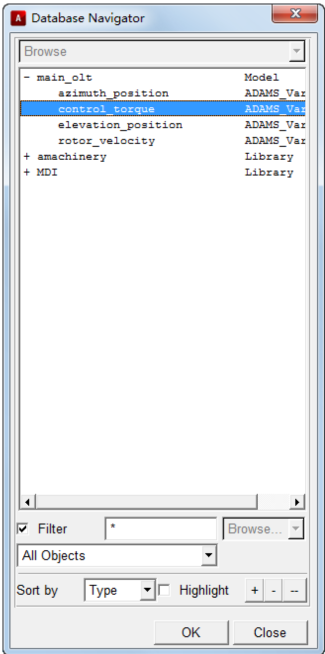


图 11-21 数据浏览对话框

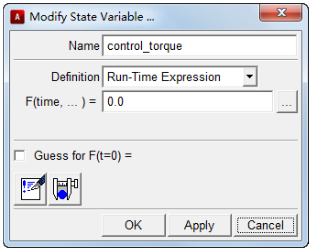


图 11-22 修改变量对话框

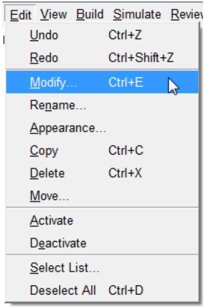


图 11-23 Edit 菜单

（8）在打开的 Database Navigator 对话框中双击数据浏览对话框中的 main_olt，选择 azimuth_actuator（即控制力矩的名），如图 11-24 所示，单击 OK 按钮。

（9）系统弹出修改力矩对话框，如图 11-25 所示。其中力矩函数为：

VARVAL（.main_olt.control_torque）

（10）单击 Cancel 按钮关闭该修改对话框。

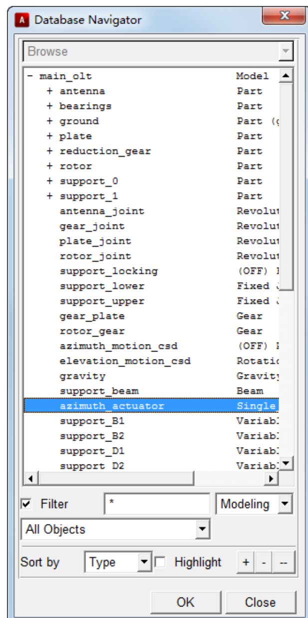


图 11-24　数据浏览对话框

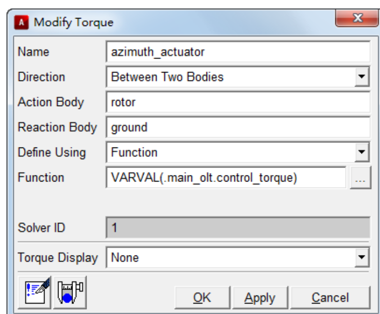


图 11-25　修改力矩对话框

11.2.6　核实输出变量

（1）选择 Build 菜单下的 System Elements→State Varible→Modify。

（2）在打开的 Database Navigator 对话框中双击 main_olt。

（3）在继续打开的 Database Navigator 对话框选择 azimuth_position。

（4）单击 OK 按钮，弹出修改变量对话框，如图 11-26 所示。F（Time）函数值为：

AZ（MAR70，MAR26）

（5）单击 Cancel 按钮关闭该对话框。

（6）选择 Build 菜单下的 System Elements→State Varible→Modify。

（7）在弹出的数据浏览框中双击 main_olt，选择 rotor_velocity。

（8）单击 OK 按钮，弹出修改变量对话框，如图 11-27 所示。函数值为：

WZ（Mar21，Mar22，Mar22）

（9）单击 Cancel 按钮关闭该对话框。

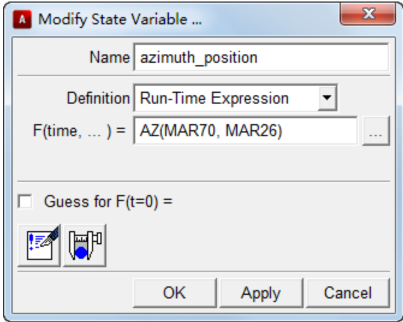


图 11-26　修改变量对话框 1

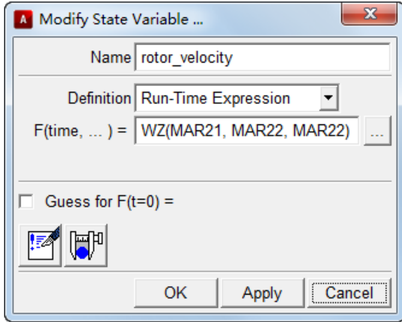


图 11-27　修改变量对话框 2

11.2.7　导出 ADAMS 模型

（1）确定工作路径。选择 File 菜单下的 Select Directory，如图 11-28 所示，在弹出的对话框中选择工作路径，如图 11-29 所示，然后单击确定按钮。

（2）选择 Controls 菜单下的 Plant Export 命令，如图 11-30 所示。

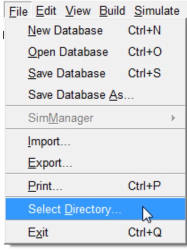


图 11-28　File 菜单

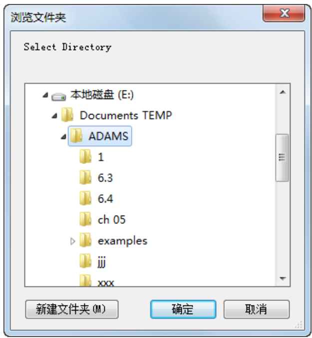


图 11-29　选择工作路径

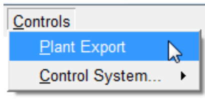


图 11-30　Controls 菜单

弹出导出对话框，如图 11-31 所示。

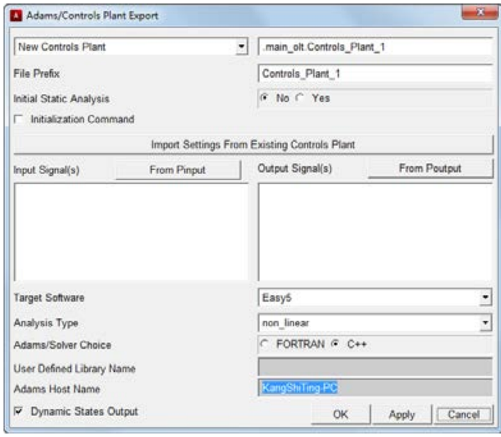


图 11-31　导出对话框

（3）在 File Prefix 栏输入 ant_test。

（4）在 From Pinput 栏单击鼠标左键，选择 tmp_MDI_PINPUT。

（5）单击 OK 按钮。

（6）在 From Poutput 单击鼠标左键，选择 tmp_MDI_POUTPUT。

（7）单击 OK 按钮。

（8）Target Software 下拉选项中选择控制程序 MATLAB。

（9）确认 Analysis Type 设为 non_linear，Initial Static Analysis 设为 No，如图 11-32 所示。

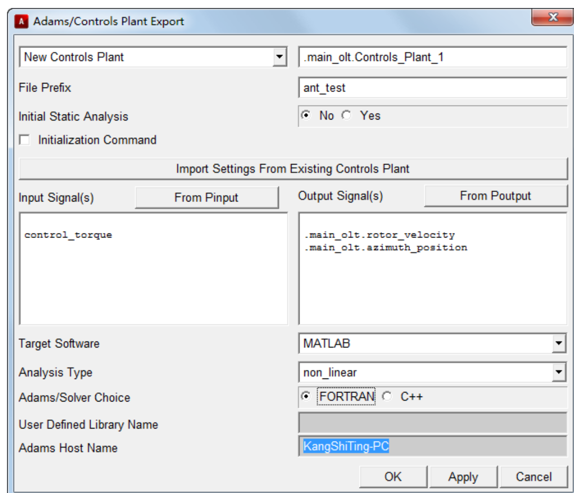


图 11-32　设置完的导出对话框

（10）单击 OK 确认设置完毕。

ADAMS/Controls 保存输入输出信息在 ant_test.m 文件中，并生成 ant_test.cmd 命令文件和 ant_test.adm 数据文件，生成的文件保存在图 11-29 所示选择的工作路径中。

ADAMS/Controls 会为 ADAMS 模型生成线性输出模型，存于 ADAMS_a，ADAMS_b，ADAMS_c，ADAMS_d 共 4 个矩阵中。

11.3 ADAMS/Controls 和 MATLAB 集成建模

接下来说明如何把 ADAMS/Controls 导出的模型输入到 MATLAB 中。

11.3.1　开启 MATLAB

（1）启动 MATLAB 应用程序。

（2）进入刚才 ADAMS 中输出文件的目录，即输出模型文件 ant_test.m 所在的目录。

（3）在操作提示符下，输入 ant_test，结果如图 11-33 所示。

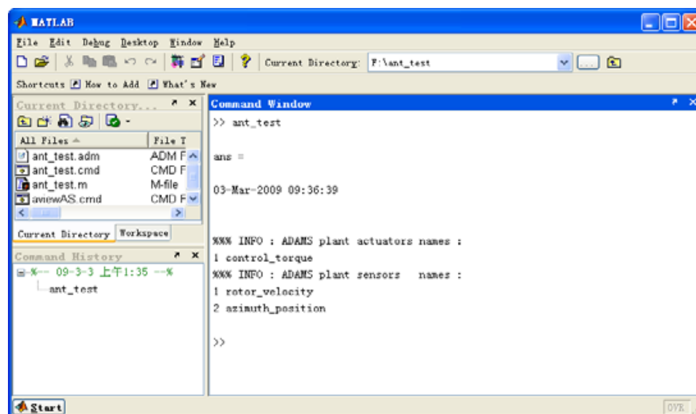


图 11-33　MATLAB 界面

（4）输入 who 查看文件中定义的变量，如图 11-34 所示。

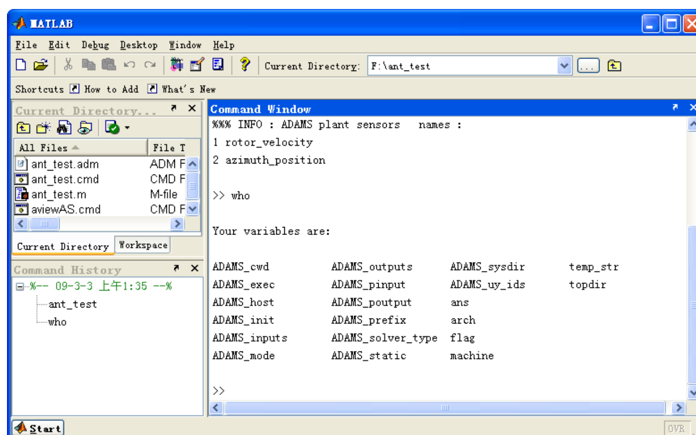


图 11-34　MATLAB 显示变量界面

（5）如果想查看变量的值，可以直接输入变量名，如图 11-35 所示。

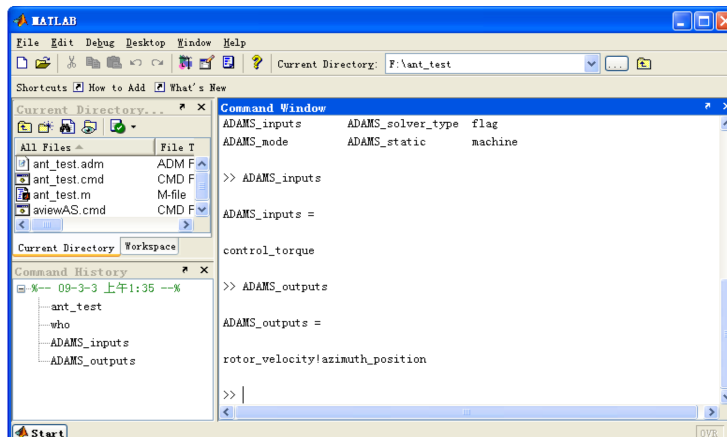


图 11-35　查看变量结果

11.3.2　创建控制系统模型

（1）在 MATLAB 提示符下，输入 adams_sys。在 MATLAB simulink 模块中新建一个 adams_sys.mdl 控制模块（如图 11-36 所示），显示子系统内部的元素和结构。

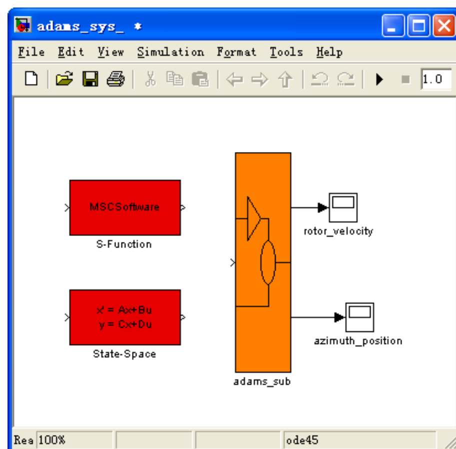


图 11-36　控制模板

（2）关闭该窗口。前面在模型中定义的输入输出变量均出现在子模块中，名字从 ant_text.m 文件中自动读取获得。

11.3.3　搭建控制系统模型

完整的控制系统在 ADAMS 目录下的 antenna.mdl 中，为了节省时间可以直接调入该文件，也可以通过 simulink 模块集手动搭建该控制系统。

（1）选择 File 菜单下 Open 命令，从 ADAMS 安装目录下的 controls/examples 目录打开 antenna.mdl，载入后如图 11-37 所示。

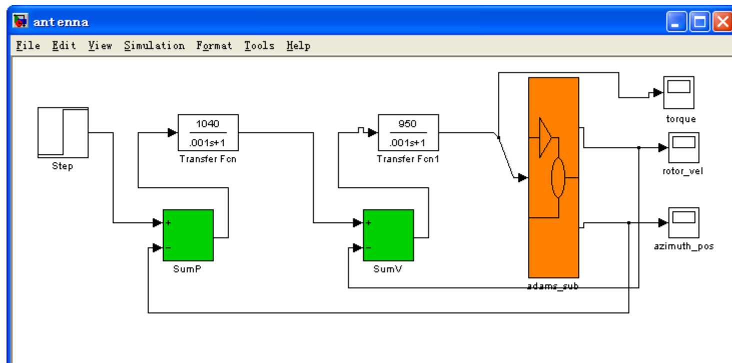


图 11-37　控制模块流程图

（2）选择 File 菜单下 Save as 命令，输入任意名字保存该控制模块。

11.3.4 设置仿真参数

（1）在控制流程图中，双击 adams_sub 模块，显示 adams_sub 子模块元素结构图，如图 11-38 所示。

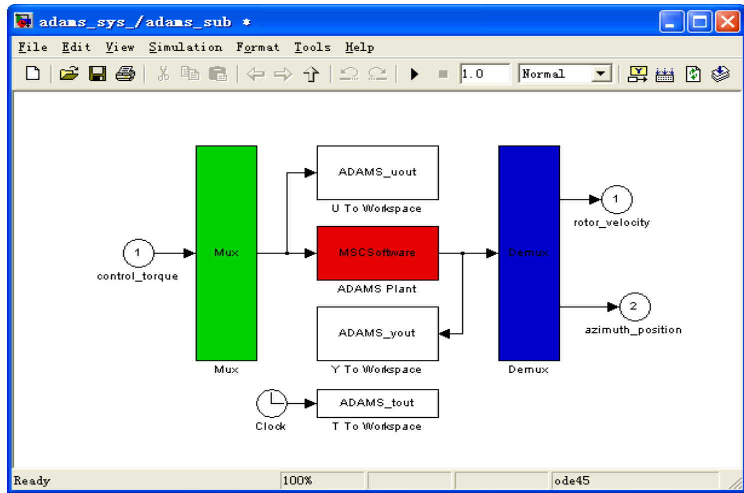


图 11-38 adams_sub 子模块

（2）在 adams_sub 子模块中，双击红色 Msc Software 模块，弹出参数设置对话框，如图 11-39 所示。

（3）在 Output files Prefix 栏输入‘mytest’，名字用单引号括起来。

ADAMS/Controls 用包含该名字的 3 种文件格式来保存仿真结果，如表 11-1 所示。

（4）设置 Communication Interal 为 0.005。

（5）设置 Number of communications per output step 为 1。

（6）设置 Simulation mode 为 discrete，设置 Animation mode 为 interactive。

（7）设置初始化 ADAMS 模型参数：Initial Static Simulation Flag 为 ADAMS_static，Initialization commands: ADAMS_init。

（8）设置完毕如图 11-40 所示，单击 OK 按钮。

表 11-1 文件类型

文件名字	文件类型	文件内容
Mytest.res	数据结果文件	ADAMS/Solver 分析数据以及 ADAMS/View 分析数据
Mytest.req	数据结果文件	ADAMS/Solver 分析数据
Mytest.gra	图形文件	ADAMS/View 图形数据

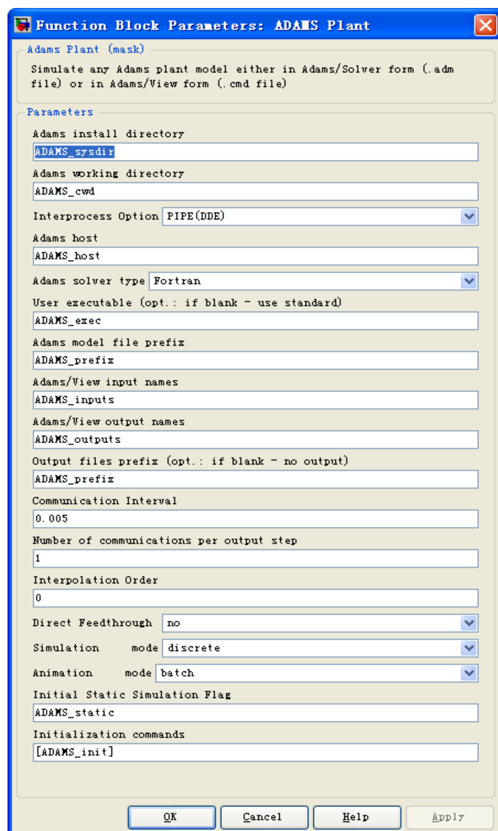


图 11-39　设置参数对话框

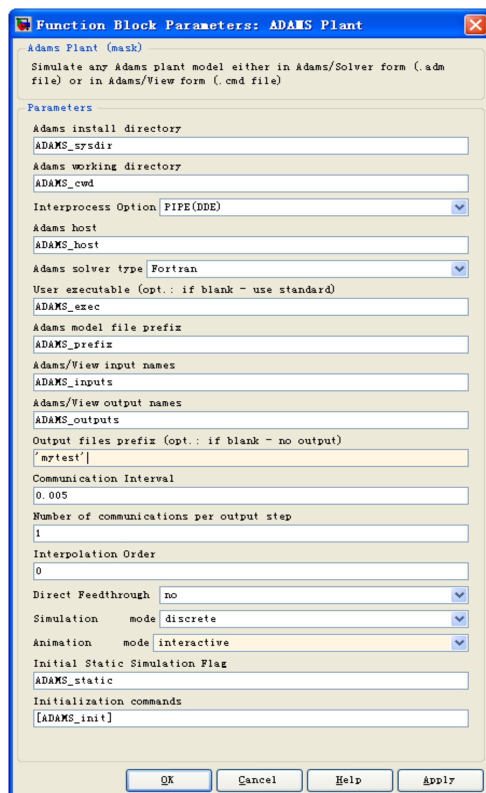


图 11-40　设置参数

11.3.5　运行模型仿真

（1）在 MATLAB simulink 窗口选择 simulink 菜单下的 simulation parameters 命令设置仿真参数。

（2）系统打开 simulation parameters 对话框，设置仿真时间、求解器类型等，如图 11-41 所示。

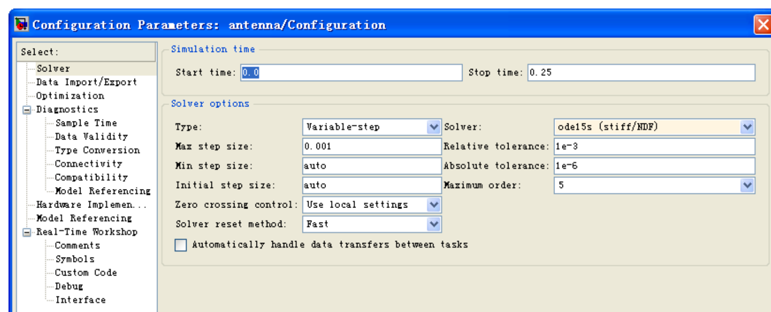


图 11-41　设置仿真参数

（3）设置完毕，单击 OK 按钮关闭。

(4)选择 simulink 菜单下 start 命令开始仿真,在屏幕上可以看到 ADAMS/Controls 在进行动态仿真。

11.3.6　绘制仿真结果

仿真结束后可以在 MATLAB 中绘制仿真结果。

在 MATLAB 提示符下输入：

Plot（ADAMS_tout，ADAMS_uout）

添加标签：

XLabel（‘time in seconds’）

YLabel（‘Control Torque Input，N-mm’）

Title（‘ADAMS/Controls Torque Input from MATLAB to ADAMS’）

绘制的控制力矩曲线如图 11-42 所示。

仿真结果也可以在 ADAMS/View 中绘制。

（1）导入 ant_test.cmd 文件。选择 File 菜单下的 Import 命令，在文件选择对话框中，将 File Type 设为 ADAMS Results File，Files To Read 设为 adams mytest.res，Model Name 为 main_olt。如图 11-43 所示。设定完毕，单击 OK 按钮。

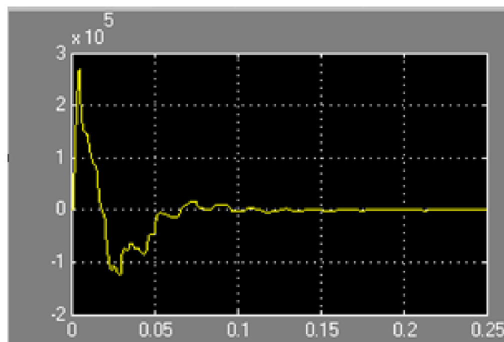


图 11-42　控制力矩曲线

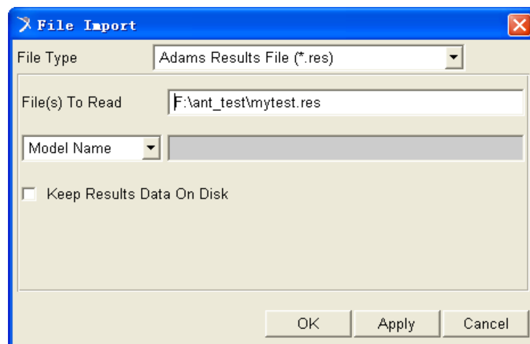


图 11-43　文件选择对话框

（2）选择 Review 菜单下的 PostProcessing 命令或者主工具箱中的按钮，打开 Postprocessor 窗口。

设置 Source 为 Results Sets。Simulation 选项中选择 mytest。Result Set 选择 control_torque。Componet 选择 Q。单击 Add Curves 按钮，添加数据结果曲线界面如图 11-44 所示。

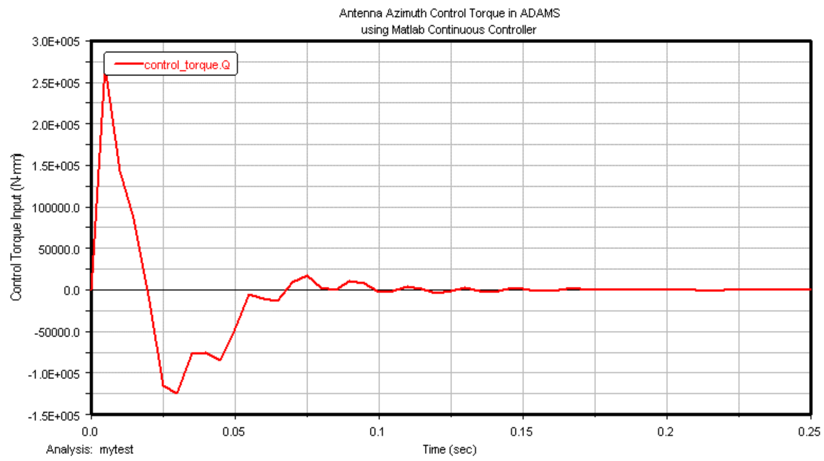


图 11-44　天线铰接处的力矩曲线

第 12 章 汽车系统仿真

ADAMS/Car 是一种基于模板的建模和仿真工具。用户只需在模板中输入必要的数据，ADAMS/Car 就可以自动建立子系统和整车装配模型。本章简要讲解 ADAMS 中专业车辆模块 ADAMS /Car，并通过创建悬挂系统、整车装配等来展示如何应用这个专业模块进行设计和仿真。

学 习 要 点

- 用户创建模板、创建悬挂系统
- 分析弹性体对悬挂装配的影响
- 包含弹性体的整车装配
- 创建轮胎模型、整车动力学仿真分析
- ADAMS/Insight 在 ADAMS/Car 中的使用

ADAMS/Car 可以用于几乎任何一种车辆的设计中。使用 ADAMS/Car，工程师可以建整车的虚拟样机，修改各种参数并快速观察车辆的运转状态，动态显示仿真数据结果。

在专家模式中使用 ADAMS/Car，工程师可以根据本公司的工程经验建立用户自定义模板，以帮助新来的工程师应用该模板进行各种工况标准的整车性能仿真试验。运用 ADAMS/Car 在制造实验物理样机之前对设计进行研究，以降低费用并缩短将产品推向市场的时间。使用模板，标准化车辆设计过程。按照特定的车辆设计过程，用户自定义模板，并与设计小组共享。简化模型建立并减少数据输入，加快设计进程。其应用范围涵盖紧凑型或者全尺寸客车、豪华轿车、轻型客车、重型卡车、公共汽车、军用车辆等。

12.1 用户创建模板

ADAMS/Car 中的模板定义了车辆模型的拓扑结构。创建模板即定义部件，研究部件之间的连接及与其他模板和试验台（Test rig）如何交换信息。

在模板这一级工作时，最重要的是创建部件、研究部件之间的连接和模板之间的信息交换。在其他级工作时，不能修改这些信息。其他信息如力元特性、质量特性则不是最重要的，因为可以在子系统级进行调整。

下面将创建麦弗逊前悬架的模板，并基于该模板进行悬架的运动学分析，通过这一过程，用户可以掌握创建模板的基本过程。

在 ADAMS/Car 中创建模型拓扑结构的过程如下：

（1）创建硬点。硬点定义了模型的关键位，是建模的基本单元。通过它们可以参数化更高级实体的位置和方位。创建硬点只需输入相应的坐标，这些坐标可以是来自 CAT 模型的装配图，也可以是基于实车测试得到的。

（2）创建部件。在创建好硬点之后就可以基于硬点创建部件。在创建部件之后，可以给新的部件添加几何，在 ADAMS/Car 中包括以下 4 种类型的部件：

- 刚性体。
- 柔性体。
- 底座部件（Mount Part），无质量的部件，在装配过程中会被其他部件替换。
- 开关部件（Switch Part），无质量的部件，用于连接，其作用就像开关。

（3）创建部件之间的连接。部件之间的连接包括铰链、橡胶衬套（Bushing）和参数。这些连接决定了部件之间如何相互作用。连接可以有两种模式，即铰链-运动学模式和衬套-弹性模式，后者要考虑衬套的弹性变形特性对悬架运动学和动力学的影响。

12.2 创建悬挂系统

本节将在 ADAMS/Car 环境中建立一个基于双 A 臂(Double-wishbone)设计且存储于模板中的前悬挂系统作为子系统。

12.2.1 创建前悬挂子系统

启动ADAMS Car模块。

（1）依次单击“开始”→“所有程序”→“MSC.Software”→“Adams 2012”→“ACar”→“Adams - Car”，启动 ADAMS Car 模块，启动欢迎界面如图 12-1 所示。

（2）单击 OK 按钮。

（3）在 Setting 菜单中选择 View Background Color 命令，如图 12-2 所示，ADAMS/View 将显示一个背景颜色选择对话框，自定义背景颜色为白色，如图 12-3 所示，单击 OK 按钮。

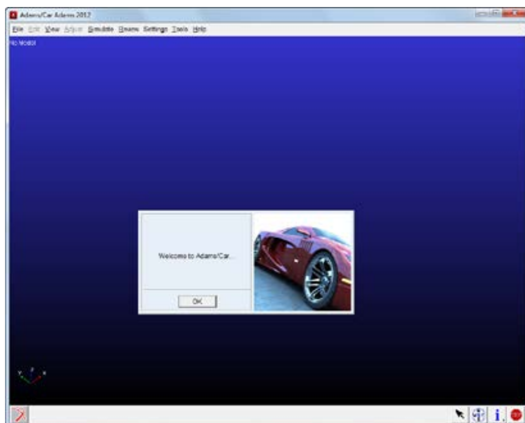


图12-1 ADAMS Car启动界面

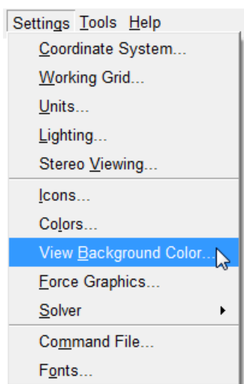


图 12-2 Setting 菜单

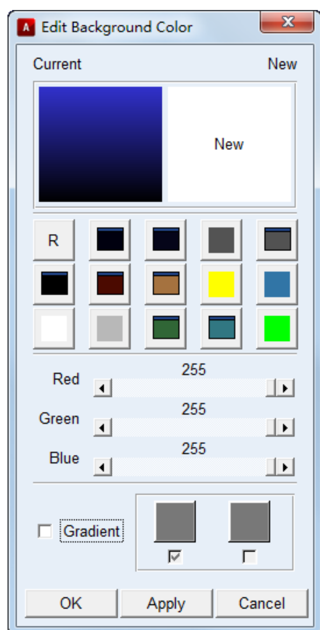


图 12-3 背景颜色设置对话框

（4）在 File 菜单中选择 New→Subsystem，如图 12-4 所示，弹出 New Subsystem 对话框，如图 12-5 所示。

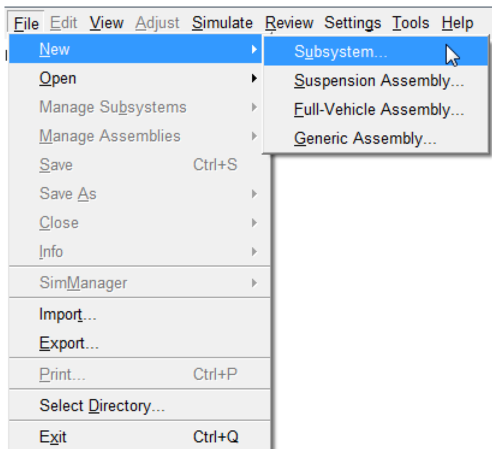


图12-4　File菜单

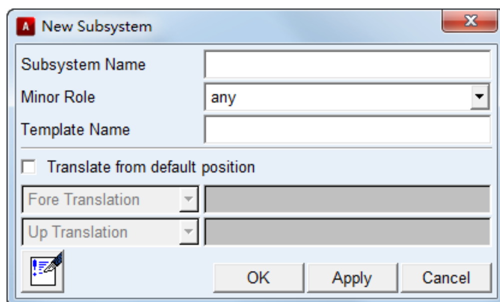


图12-5　New Subsystem对话框

（5）在 Subsystem Name 栏输入 UAN_FRT_SUSP。选择 Minor Role 为 front。在 Template Name 栏单击鼠标右键，选择 Search 项中的<acar_ shared>/templates.tbl，如图 12-6 所示。

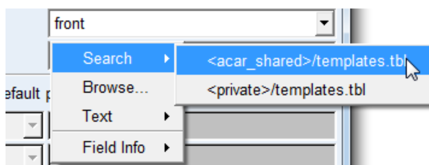


图12-6　快捷菜单

（6）在弹出的对话框中选择_double_wishbone.tpl，如图 12-7 所示，单击 OK 按钮。

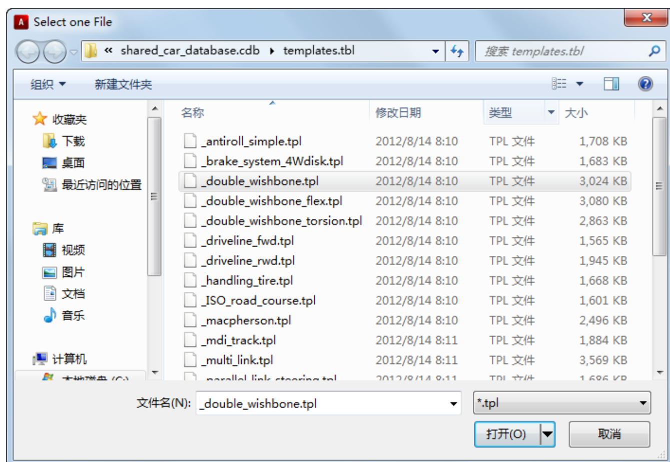


图12-7　选择文件

（7）确认 Translate from default position 选项前的“√”没被选中。

（8）单击 Comment 工具，弹出 Modify Comment 对话框，如图 12-8。

（9）在 Comment Text 栏中，输入 Baseline UAN Front Suspension，单击 OK 按钮。

（10）确认输入如图 12-9 所示，然后单击 OK 按钮。

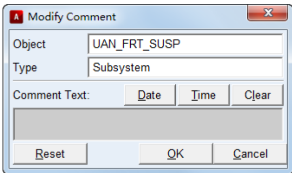


图12-8　修改注释对话框

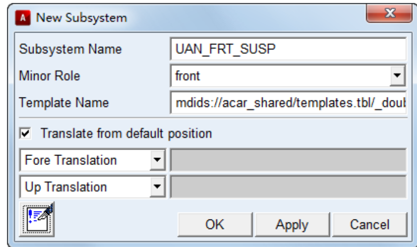


图12-9　完成子系统对话框

（11）在 ADAMS/Car 工作区域呈现前悬挂样图，如图 12-10 所示。

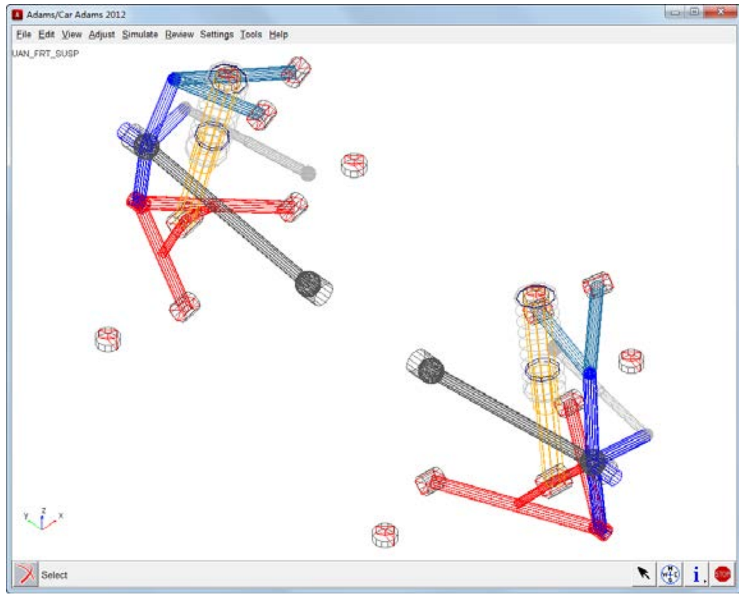


图12-10　悬挂子系统

（12）选择主菜单的 File →Save，如图 12-11 所示，系统打开提示框，如图 12-12 所示，单击 NO 按钮，不保留备份文件。

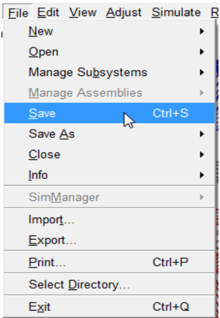


图12-11　File菜单

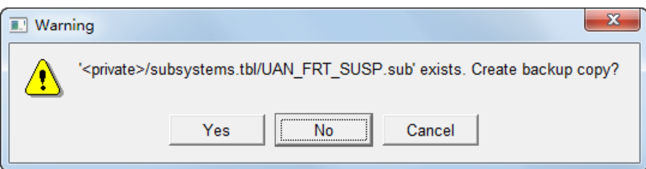


图12-12　提示框

12.2.2　创建悬挂和转向系统

（1）选择主菜单的 File →New →Suspension Assembly 命令。

（2）在弹出的 New Suspension Assembly 对话框中的 Assembly Name 的栏输入 my_assembly，如图 12-13 所示。

（3）单击 Suspension Subsystem 右侧文件夹按钮，建立的悬挂系统名字自动出现。

（4）点中 Steering Subsystem 栏前面的“√”。

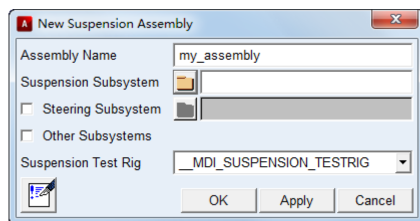


图12-13　New Suspension Assembly对话框

（5）在 Steering Subsystem 栏单击鼠标右键，选择 Search → <acar_ shared> / subsystems.tbl。

（6）在弹出的窗口中双击 MDI_FRONT_STEERING.sub，如图 12-14 所示。

（7）确认如图 12-15 所示后，单击 OK 按钮。

（8）弹出信息窗口，如图 12-16 所示。单击 Close 按钮，关闭弹出的信息窗口。完成了转向装配系统的创建，如图 12-17 所示。

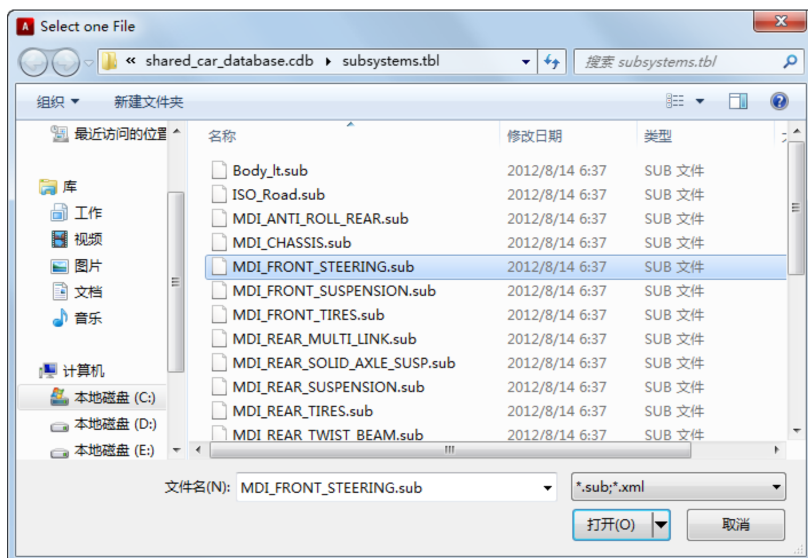


图12-14　选择文件对话框

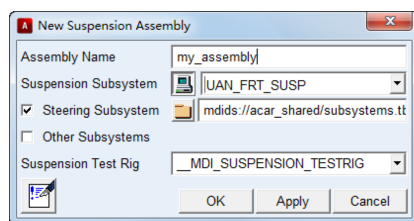


图12-15　悬挂装配系统对话框

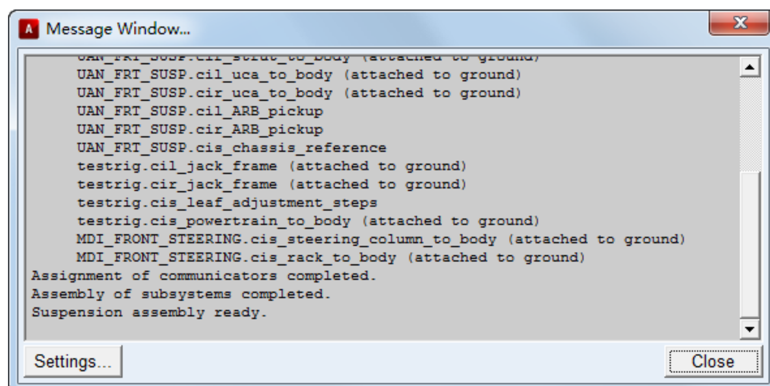


图12-16　信息窗口

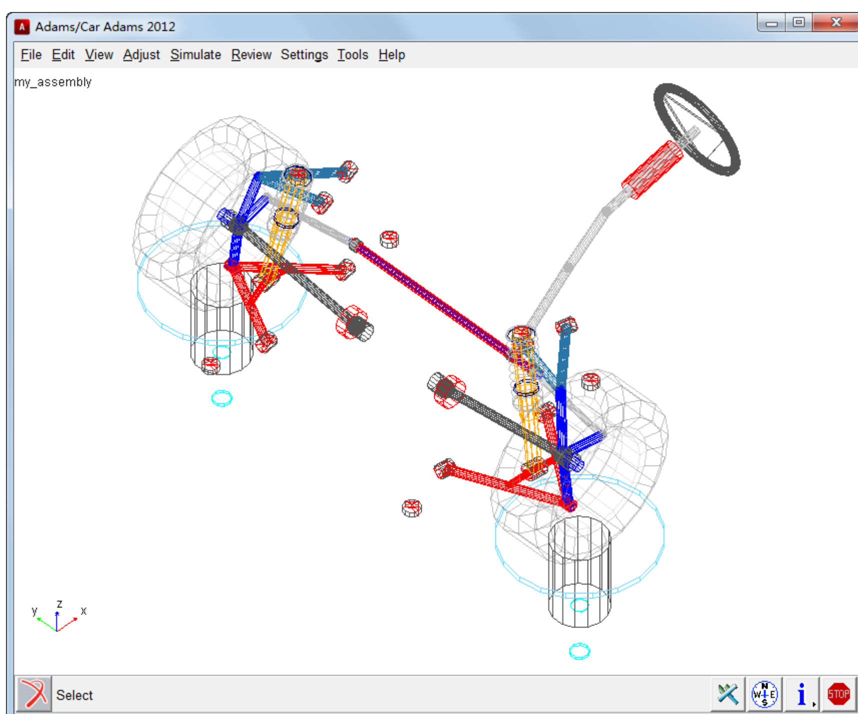


图12-17　转向系统

12.2.3　定义车辆参数仿真

（1）依次选择主菜单中 Simulate → Suspension Analysis → Set Suspension Parameters。在弹出的对话框输入图 12-18 所示的参数和选项，单击 OK 按钮，这样驱动力就添加到前轮里。

（2）依次选择主菜单中的 Simulate → Suspension Analysis → Parallel Wheel Travel…。

（3）在弹出的对话框中输入如图 12-19 所示参数。

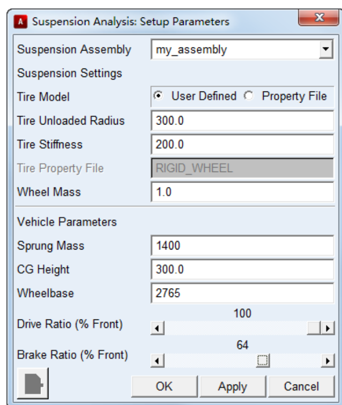


图12-18　设置参数

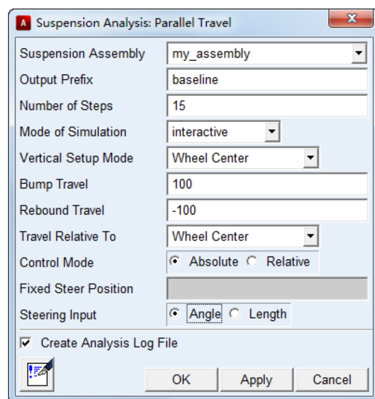


图12-19　参数设置

（4）单击 Comment 工具，在弹出对话框的 Comment Text 栏中输入 Baseline Parallel Wheel Travel Analysis，单击 OK 按钮。

（5）单击 OK 按钮，运行 parallel wheel travel 分析程序，并弹出信息窗口，如图 12-20 所示，在此分析中车轮中心可以在相对输入位置的±100mm 内移动，在此移动过程中计算出诸如车轮外倾角、束角、轮速、滚动中心高度等。

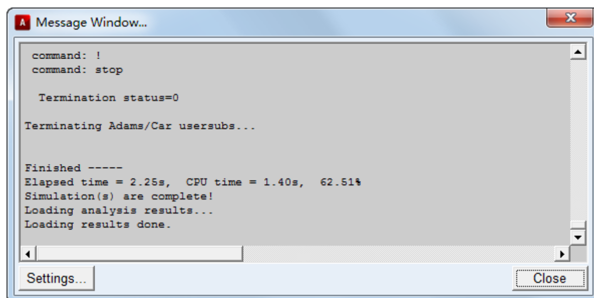


图12-20　信息窗口

（6）单击 Close 按钮关闭信息窗口。

（7）在主菜单中依次选 Review→Animation Controls→Play 对模型运行仿真，如图 12-21 所示。

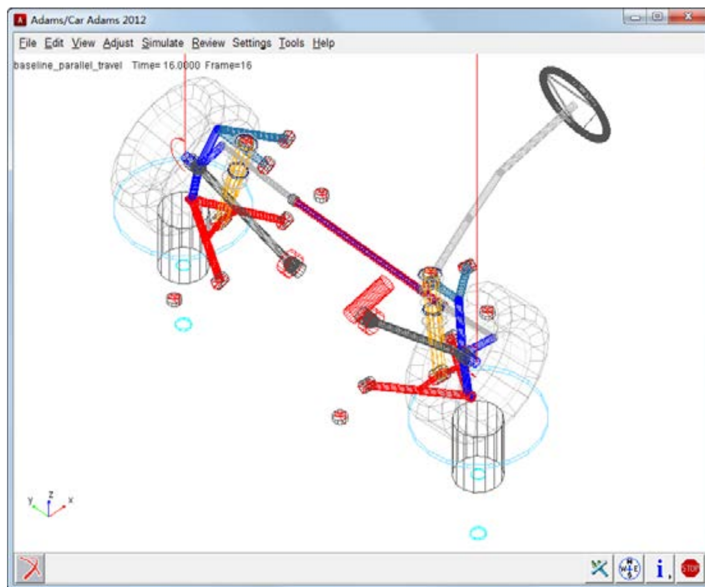


图12-21 运行仿真

12.2.4 绘制仿真曲线

（1）从主菜单依次选择 Review → Postprocessing Window 或单击 F8 键即可进入 ADAMS / PostProcessor 进行曲线绘制。

（2）在主菜单中选择 Plot→Create Plots。

（3）在弹出的对话框中 Plot Configure File 栏单击鼠标右键，依次选择 Search → <acar_shared> / Plot_configs.tbl。

（4）在选择文件对话框中双击 mdi_suspension_short.plt。

（5）在 Plot Title 栏中输入 Baseline Parallel Wheel Travel Analysis-UAN_FRT _SUSP，如图 12-22 所示。

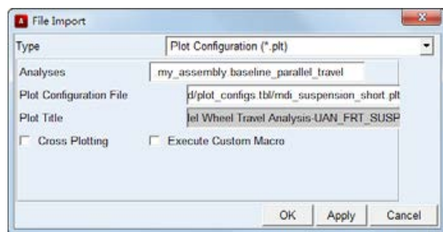


图12-22 导入文件对话框

（6）单击 OK 按钮即完成曲线的绘制，可以通过主工具栏的翻页察看，如图 12-23 所示。

（7）在上面对话框左侧树状目录区，按住鼠标左键选择所有曲线。选择 Edit→Delete 命令，删除这些文件如图 12-24 所示。

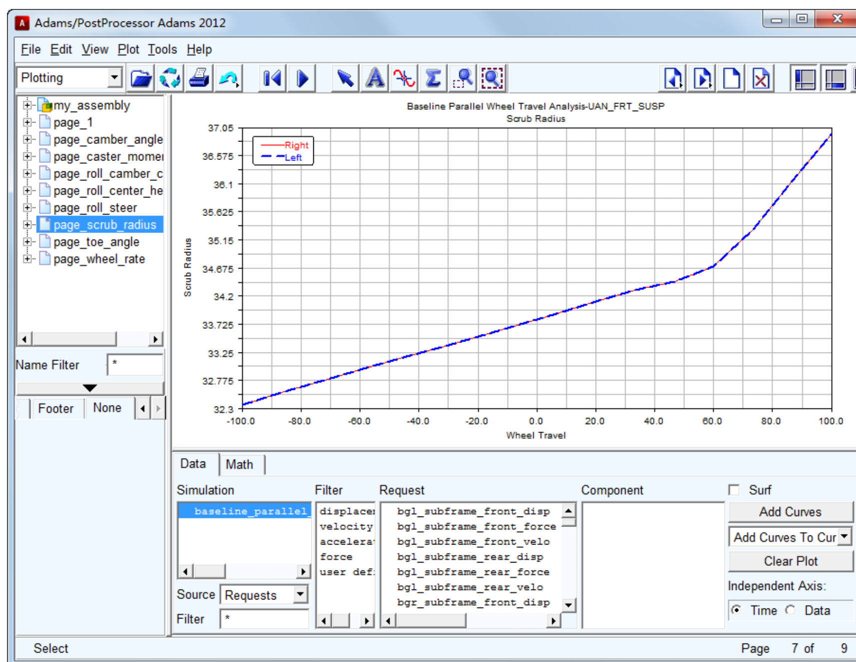


图12-23　绘制仿真曲线

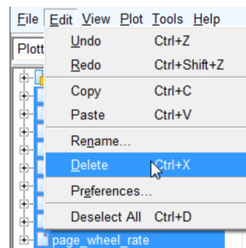


图12-24　Edit菜单

12.2.5　分析基本推力

首先创建一个载荷文件给左右轮施加不等的制动力以用来仿真各个转向角。为了计算不等的制动力，我们给质量为1400kg的车辆一个负0.5g的加速度 ，其前轮的制动比为64%后轮的制动比为36%，前左轮分配前制动力的55%、前右轮分配前制动力的45%，前轮总的制动力为4395 N，左前轮制动力为2417 N、右前轮制动力为1978 N。

12.2.6　定义和施加载荷文件

（1）按 F8 从 ADAMS/PostProcessor 返回到 ADAMS/View。

（2）在主菜单中依次选择 Simulate →Suspension Analysis → Create Loadcase。在弹出的对话框中输入图 12-25 所示参数。

（3）输入完毕单击 OK 按钮，ADAMS/Car 建立名为 brake_pull.lcf 的文件被保存到本地工作目录下，然后即可以用载荷文件来研究悬挂及转向系统的特性。

（4）在主菜单中选择 Simulate → Suspension Analysis → External Files。在弹出的对话框中输入如图 12-26 所示参数。

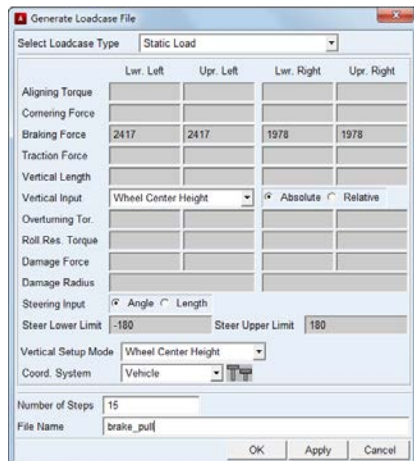


图12-25　载荷文件对话框

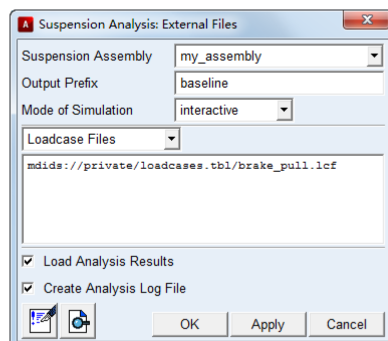


图12-26　设置分析选项

（5）单击 Comments 按钮，在弹出的对话框的 Comment Text 中输入 Baseline Pull Analysis，单击 OK 按钮。回到图 12-26 所示对话框，单击 OK 按钮。

（6）ADAMS/Car 对悬挂系统进行分析，并弹出信息窗口。关闭此窗口。

（7）选择主菜单中的 Review → Animation Controls→Play，对模型进行仿真，如图 12-27 所示。

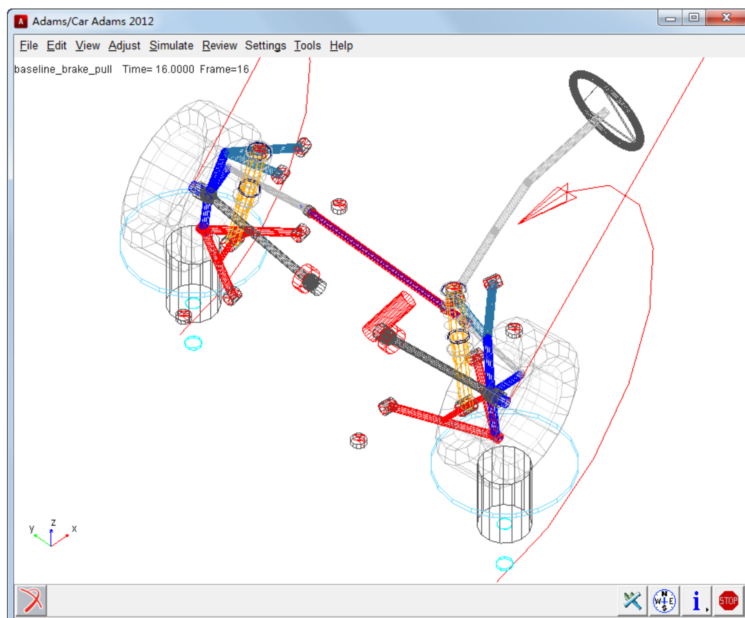


图12-27　仿真分析

12.2.7　绘制仿真曲线

（1）在主菜单依次选择 Review → Postprocessing Window 或单击 F8 键即可进入 ADAMS/ PostProcessor 进行曲线绘制。

（2）单击左边树状图的 page_1。选择 plot_1，在下边的编辑选项中，不选 Auto Title 和 Auto Subtitle。在 Title 对话框中输入 Brake Pull Analysis，在 Subtitle 对话框中输入 Steering Wheel Torque vs Steering Wheel Angle。

（3）在树状图区域右击打开快捷菜单，依次选择 Type Filter→Plotting→Axes。

（4）单击 plot_1 选择 haxis，然后在编辑栏 Labels 选项的 Label 对话框中输入 Steering Wheel Angle [degrees]。

（5）选择 vaxis，在编辑栏 Labels 选项 Label 对话框中输入 Steering Wheel Torque [Nmm]，完成曲线图框的建立。

（6）在屏幕下方 Source 选项中选 Requests。在 Simulation 栏中选 baseline_brake_pull。把右下角的 Independent Axis 设为 Data。

（7）在弹出的对话框的 Filter 栏中选 user defined。在 Request 的列表中选 steering _ displacements，在 Component 的列表中选 angle_front，如图 12-28 所示，单击 OK 按钮。

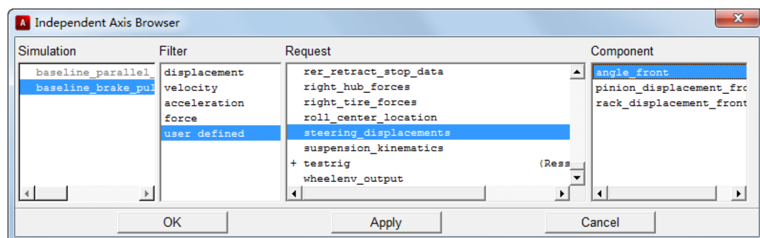


图12-28　输出曲线选项对话框

（8）在 Filter 列表选项中选择 user defined，在 Request 列表中双击 testrig，然后选择 steering_wheel_input 选项。在 Component 列表中选择 steering_wheel_input_torque 选项，如图 12-29 所示。然后单击 Add Curves 按钮，如图 12-30 所示。

（9）从主工具菜单中选择 New Page 图标新建一张图表 page_2。

（10）选 page_2 的 plot_2，不选 Auto Title 和 Auto Subtitle，在 Title 栏中输入 Brake Pull Analysis，在 Subtitle 栏中输入 Scrub Radius vs Steering Angle。

（11）在树状图区域右击依次选择 Type Filter→Plotting→Axes，选择树状图下 haxis，在 Labels 选项的 Label 栏中输入 Steering Wheel Angle [degrees]，同样将垂直轴命名为 Scrub Radius[mm]。

（12）在下边的 Source 选项中选 Requests，Simulation 列表中选 baseline_brake_pull，Filter 列表中选 user defined，Request 列表中选 scrub_radius，Component 列表中选 left，单击 Add Curves 按钮，即完成了转向角与刮擦半径之间的关系曲线，如图 12-31 所示。

（13）单击 F8 返回 ADAMS/Car 界面。

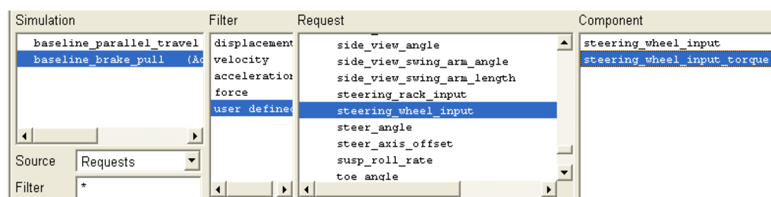


图12-29　输出曲线选项对话框

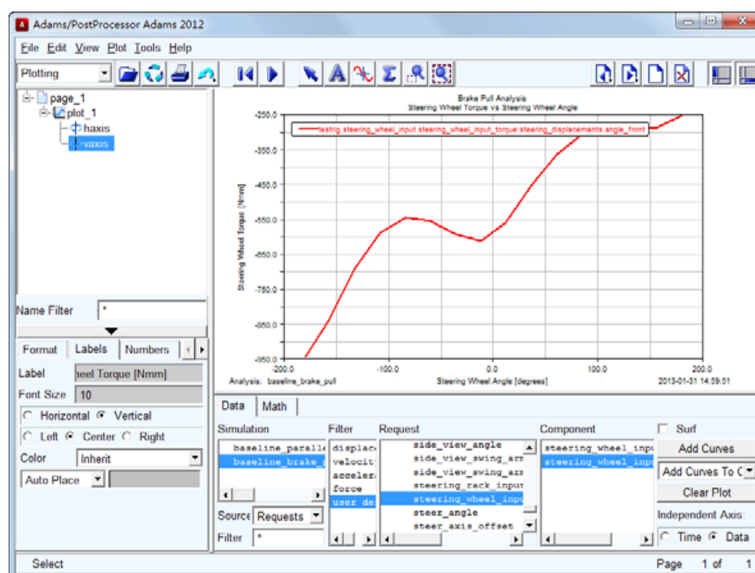


图12-30　转向轮扭矩与转角的关系曲线

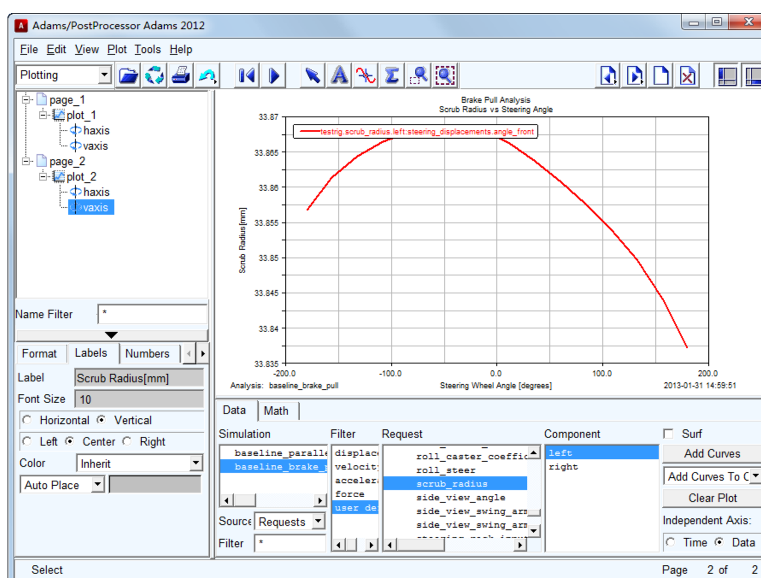


图12-31　刮擦半径与转向角关系曲线

12.2.8　修改悬挂系统与转向系统

在 ADAMS/Car 中通过改变硬点（hardpoints）的位置可以进行模型的修改。

（1)在 ADAMS/Car 环境下从主菜单中依次 View→Subsystem,弹出 Display Subsystem 对话框，已经包含 my_assembly.UAN_FRT_SUSP，单击 OK 按钮，如图 12-32 所示。

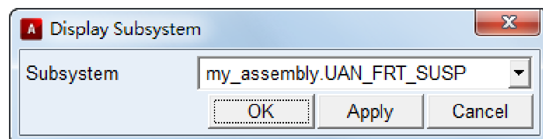


图12-32　Display Subsystem对话框

（2）从主菜单中依次 Adjust→Hardpoint→Table，弹出 Hardpoint 修改表，把 hpl_tierod _outer 的 loc_y 由原来的-750 改为-775，即向外移动 25mm，把 hpl_uca_outer 的 loc_y 由原来的-675 改为-700，即向外移动 25mm，如图 12-33 所示，单击 OK 按钮关闭对话框。

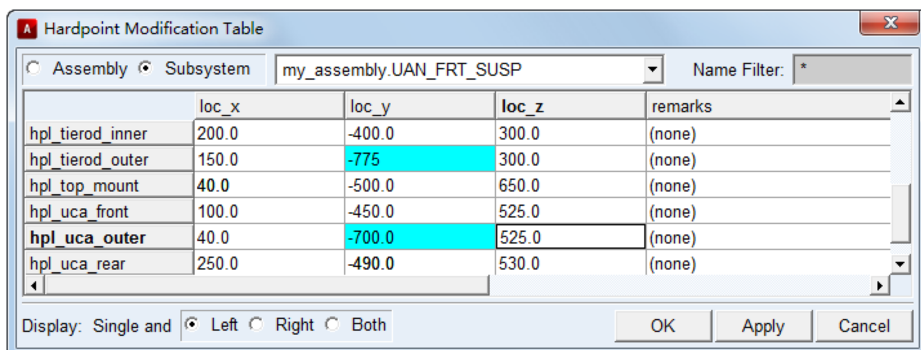


图12-33　硬点坐标修改框

（3）从主菜单依次选取 File→Save。系统打开提示框，单击 NO 按钮，不保留备份文件，如图 12-12 所示。

12.2.9　分析修改后的系统模型

（1）从主菜单依次选择 Simulate→Suspension Analysis→External Files，在弹出对话框的 Output Prefix 栏中输入 modified，如图 12-34 所示。

（2）选择 Comment 工具，在弹出对话框的 Comment Text 栏中输入 Steering axis moved 25mm outboard，如图 12-35 所示，单击 OK 按钮。

（3）系统回到图 12-34 所示对话框，再次单击 OK 按钮。

（4）ADAMS/Car 开始分析修改后的悬挂和转向系统模型，分析完毕关闭信息窗口。

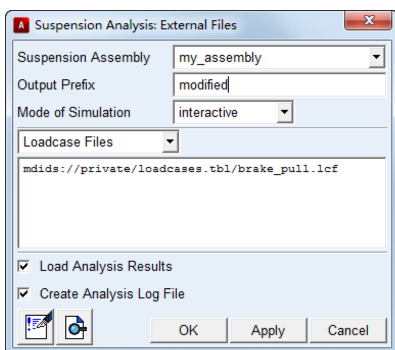


图12-34　参数设置

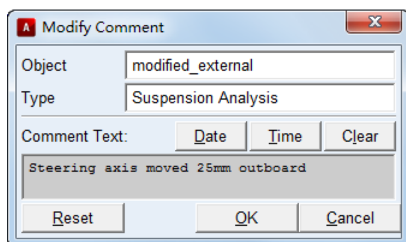


图12-35　输入文本

12.2.10　比较分析结果

（1）单击 F8 键进入 ADAMS/Postprocessor。

（2）在 Simulate 列表中选择 baseline_brake_pull，在 Request 列表中选择 Steering_Wheel _input，在 Components 列表中选择 steering_wheel_input_torque，单击 Add Curves 绘制未修改以前的曲线结果，即图 12-30 所示。

（3）绘制修改以后的结果。在 Simulate 列表中选择 Modified_brake_pull，在 Request 列表中选择 Steering_Wheel_input，在 Components 列表中选择 steering_wheel _input_torque，单击 Add Curves 绘制修改以后的曲线结果，如图 12-36 所示。

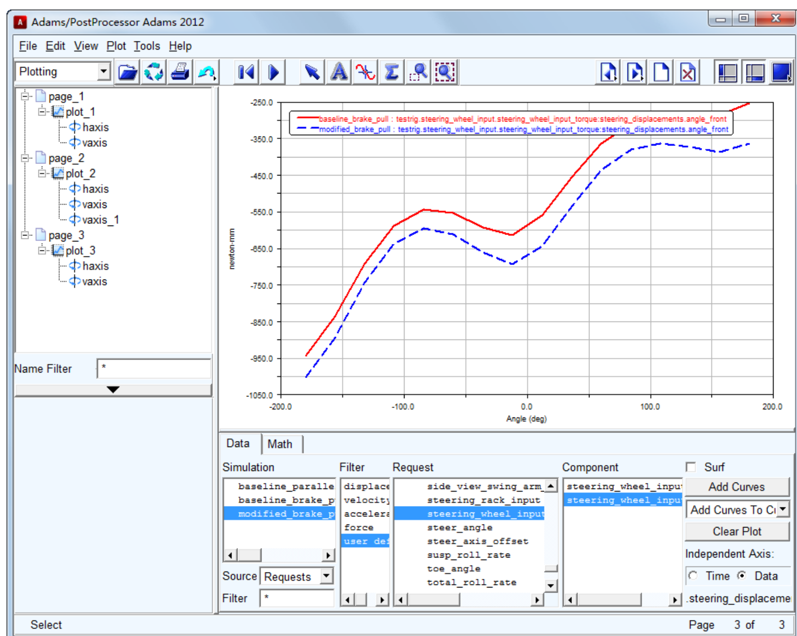


图12-36　修改前后曲线对比

12.2.11　删除仿真和绘图

为进行下一步分析，须删除仿真和绘图并且关闭创建的和已修改过的子系统。

（1）在树状图区域右击依次选择 Type Filter→Modeling→Analyses，如图 12-37 所示。

（2）显示当前的仿真，双击 my_assembly，如图 12-38 所示。

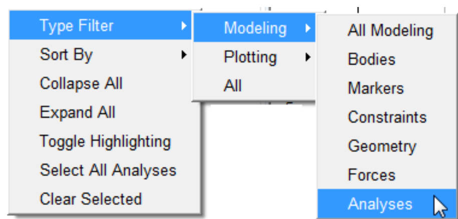


图12-37　快捷菜单

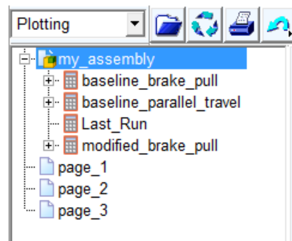


图12-38　选择对象

（3）在打开的快捷菜单中选 simulations 后，在主菜单中选 Edit→Delete 即删除仿真。

（4）关闭绘图窗口返回 ADAMS/Car。

（5）从主菜单中依次选取 File→Close→Assembly，默认是当前系统，单击 OK 按钮退出。

12.3　分析弹性体对悬挂装配的影响

本节将创建包含弹性下控制臂的悬挂装配，并学习如何处理装配中的弹性体，如何执行分析察看结果等，对比弹性杆和刚性杆的不同点。

12.3.1　创建悬挂装配

（1）在 ADAMS/Car 窗口中从主菜单中依次 File→New→Suspension Assembly，在弹出对话框的 Assembly Name 栏中输入 susp_assy，在 Suspension Subsystem 栏中单击按钮，在后面的文本框中单击右键，在打开的快捷菜单中选 Search→<acar_shared>/subsystems.tbl，如图 12-39 所示，在随后打开的选择文件对话框中选择 TR_Front_Suspension.sub，如图 12-40 所示。

（2）单击 OK 按钮，出现信息窗口如图 12-41；单击 Close 按钮，关闭信息窗口，即呈现装配图，如图 12-42 所示。

（3）在图形界面右击鼠标，打开快捷菜单，选择 Shaded<S>，如图 12-43 所示，查看阴影效果，如图 12-44 所示。

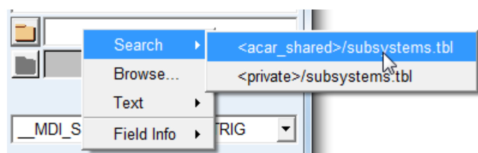


图12-39　快捷菜单

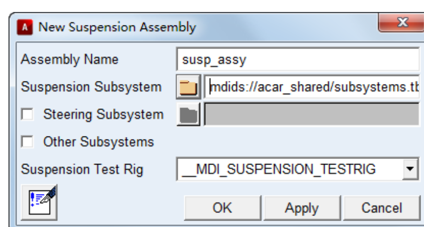


图12-40　设置参数

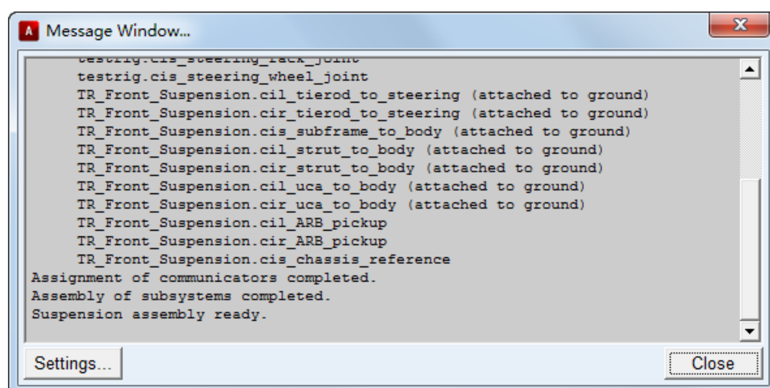


图12-41　信息窗口

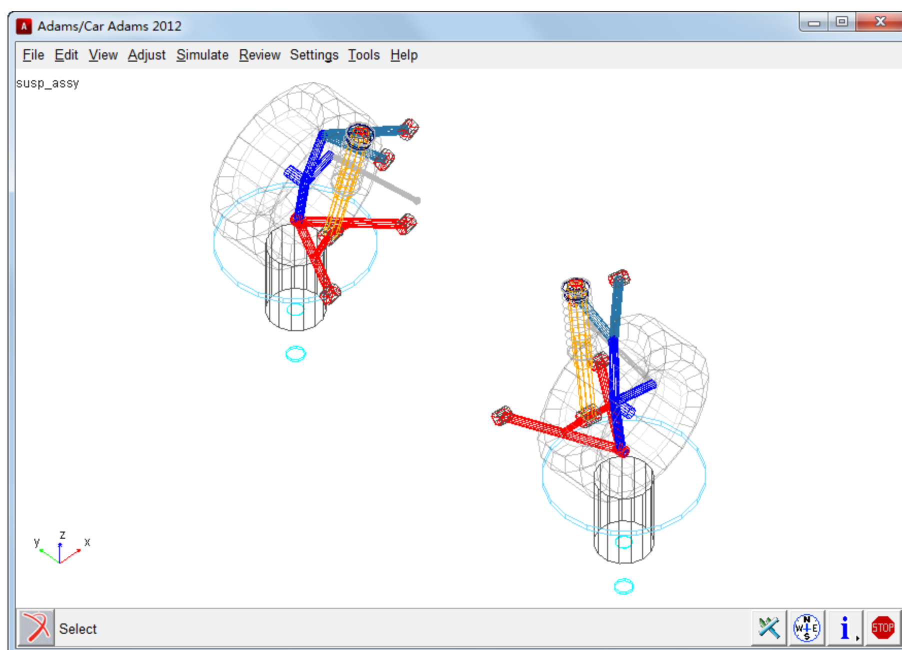


图12-42　双A臂(Double-wishbone)悬挂系统模型图

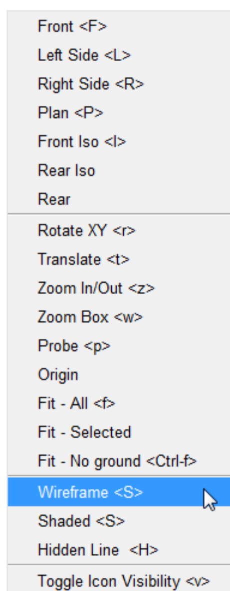


图12-43　快捷菜单

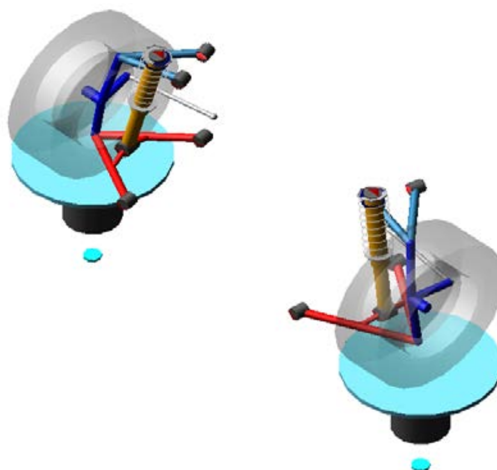


图12-44　阴影效果

12.3.2　创建弹性体

（1）右击左上侧红色控制杆，在弹出的菜单中选择模型中的 ger_lower_control_arm→ Modify，如图 12-45 所示，弹出修改对话框，如图 12-46 所示。

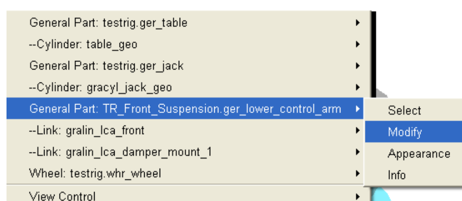


图12-45　快捷菜单

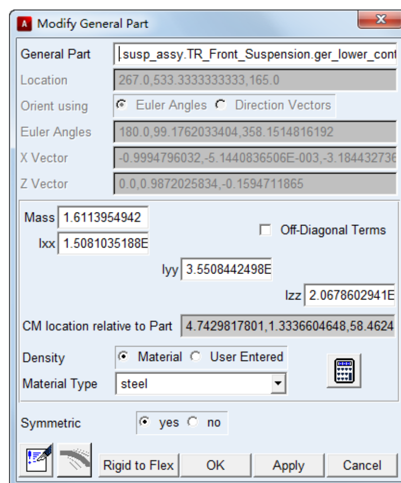


图12-46　修改对话框

（2）单击 Rigid to Flex 按钮，弹出转换对话框，如图 12-47 所示，在 MNF File 栏右击选择 Search → <Acar shared>/flex_bodys.tbl，在弹出的对话框中双击 LCA_right_shl.mnf，选中该文件。

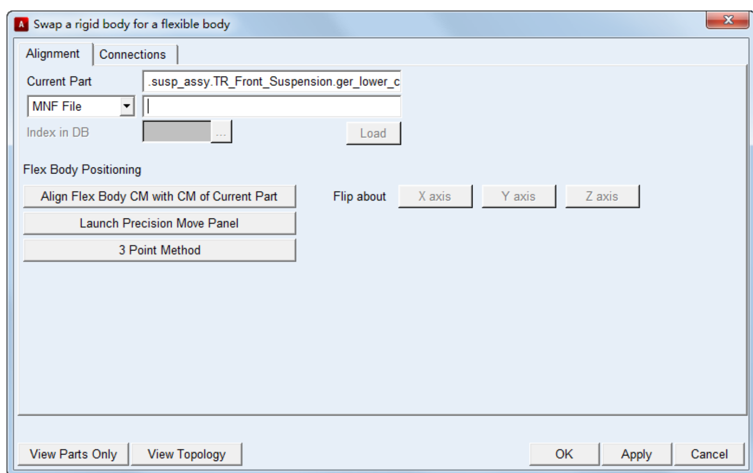


图12-47　转换对话框

（3）单击 Connections 标签，选择 Move 列，然后单击 Preserve expression 按钮，再单击 OK 按钮，ADAMS 自动完成从刚体到柔性体的转换，如图 12-48 所示。

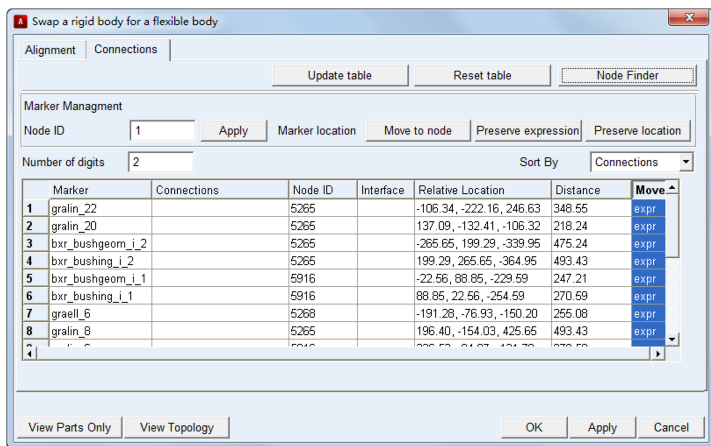


图12-48　转换对话框

（4）单击 OK 按钮关闭修改对话框。

（5）重复（1）～（4）步骤，把 gel_lower_control_arm 通过 LCA_left_shl.mnf 转换至柔性体。

12.4 包含弹性体的整车装配

12.4.1　创建整车装配

（1）从主菜单选取 File →New→ Full-Vehicle Assembly，在 Assembly Name 栏输

入 fveh_assy，在后面的空白处单击右键，选择 Search→acar_shared subsystem，如图 12-49，选择 Brake Subsystem 和 Powertrain Subsysten，依次在弹出的对话框中输入图 12-50 所示的内容。

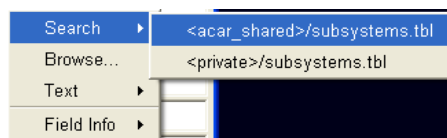


图12-49　快捷菜单

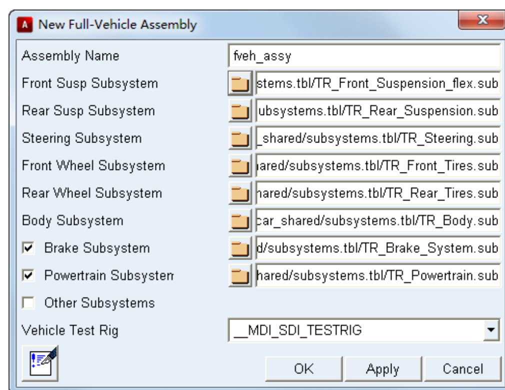


图12-50　整车参数

（2）单击 OK 按钮，出现信息窗口，单击 Close 按钮，关闭信息窗口，在 ADAMS/Car 工作区域呈现整车模型。

（3）如果习惯用白色作底，可以通过主菜单中的 Setting→View Background Color，在弹出的对话框中选择白色即可，如图 12-51 所示。

单击鼠标右键，出现快捷菜单如图 12-52 所示，在快捷菜单栏中选择 shade<d>，白色背景的整车模型如图 12-53 所示。

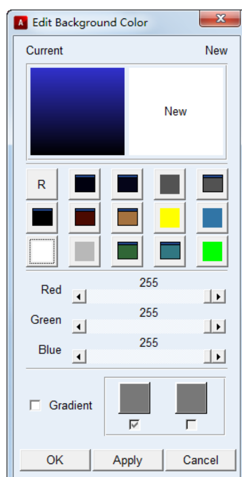


图 12-51　设置底色

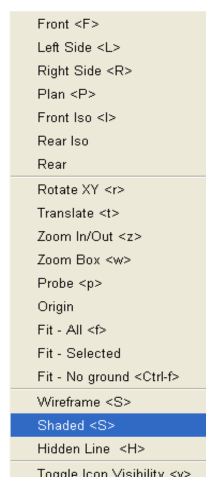


图 12-52　快捷菜单

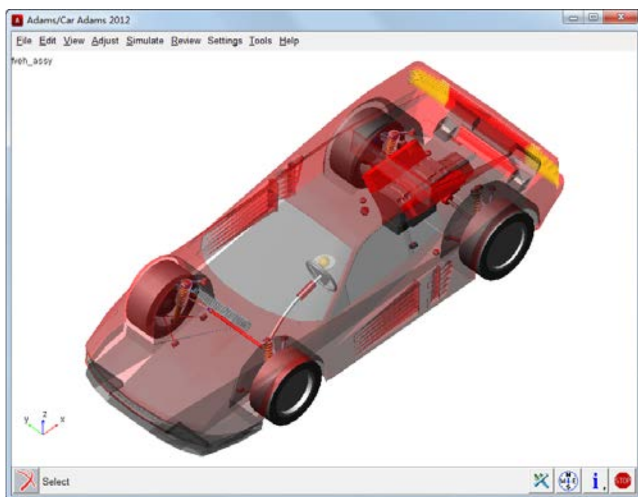


图 12-53　整车模型

（4）从主菜单中的 View→Subsystem，在打开的对话框中选择前悬挂子系统 fveh_assy. TR_ Front_Suspension_flex，单击 OK 按钮确认，如图 12-54 所示。

（5）从主菜单 Adjust→Kinematic Toggle，在弹出的对话框中置当前模式为 Kinematic，单击 OK 按钮，如图 12-55 所示。

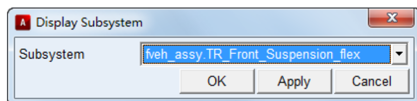


图12-54 设置参数

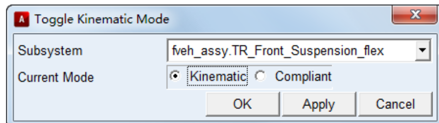


图12-55　设置参数

12.4.2　交换 MNF 文件

（1）双击右下弹性控制臂 fbl_lower_control_arm，弹出 Modify Flexible Body 对话框。

（2）在 MNF File 栏中右击选 Search 在共享文件夹中找到 LCA_left_tra.mnf，单击打开按钮。

（3）在 Flexible Body 栏中右击鼠标，在打开的快捷菜单中依次选择 Flexible Body→Pick 命令，从屏幕上拾取左下控制臂 fbr_lower_control_arm，如图 12-56 所示。

（4）单击 OK 按钮，如图 12-57 所示。

（5）从主菜单的 View→Assembly，在打开的对话框中选择 fveh_assy，单击 OK 按钮，返回到整车装配界面，如图 12-58 所示。

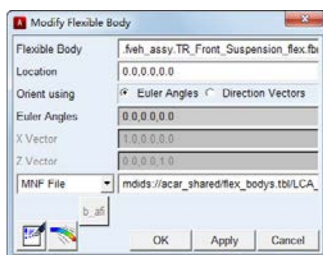


图12-56　Modify Flexible Body对话框

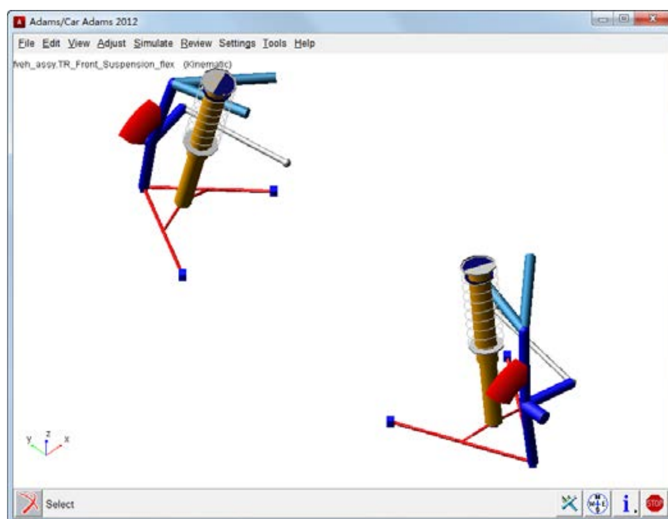


图12-57　更换后的前悬挂系统

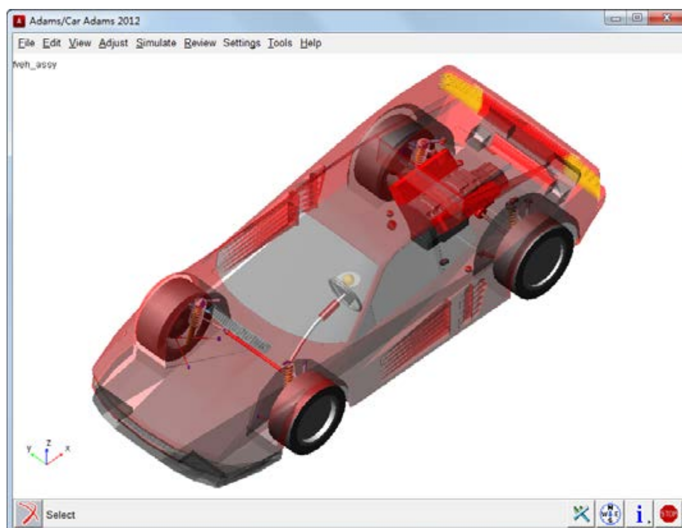


图12-58　更换后的整车模型

12.5 创建轮胎模型

轮胎是汽车的重要部件，轮胎的结构参数和力学特性决定着汽车主要的行驶性能。除空气和重力作用力外，几乎所有其他影响汽车运动的力和力矩都通过滚动的轮胎与地面相互作用而产生。轮胎所受的垂直力、纵向力、侧向力和回正力矩对汽车的平顺性、操纵稳定性和安全性起着重要作用。

在任何整车动力学模型中，轮胎模型的精确程度必须与车辆模型的精度相匹配。由于轮胎具有结构的复杂性和力学性能的非线性，如何选用符合实际又便于使用的轮胎模型仍是整车动力学模拟的关键问题。

12.5.1 轮胎模型简介

对轮胎在不同工况下的力学特性建模，已进行了较为广泛和深入的理论研究和试验研究。轮胎建模的方法大致分为 3 种，分别为经验-半经验模型、物理模型和有限元模型。

（1）经验-半经验模型是针对具体轮胎的某一具体特性，把轮胎放在试验台架上进行不同工况的试验，根据大量的试验数据，利用特殊函数进行曲线拟合，从而创建轮胎力学模型，这种建模方法称为经验模型。半经验模型是针对轮胎经验模型中某一环节引入部分的分析式所建的模型，模型所需众多参数，仍然是在对轮胎进行大量试验所得的试验数据基础上，用经验公式拟合得到的。

经验-半经验模型也是不断发展和完善的。目前应用最广泛的有荷兰 Delft 工业大学的 Pacejka 等人提出的 Magic Formula 公式和我国吉林大学郭孔辉院士利用指数函数建立的描述轮胎六分力特性的统一轮胎半经验模型（UuiTire），这些公式的计算结果与试验数据能很好地吻合。

（2）物理模型是根据轮胎的力学特性，用一物理结构代替轮胎或其某一组成部分，物理结构在外力作用下的变形被认为是轮胎变形或其某部分的变形。最原始的物理模型就是把轮胎简化为并联的弹簧和阻尼环节；比较典型的复杂物理模型有梁和弦模型。

物理模型具有解析表达式，具有解析解，能够探讨轮胎特性的形成机理。其缺点是对轮胎特性描述的精确程度较经验-半经验模型差，且弦和梁模型的计算式十分复杂，在当时的计算机条件下难以实现。其建模结果能够反映轮胎的侧偏特性，并且在某些工况下与试验结果较为一致。

由于模型所设的弦或梁从物理含义上并不代表轮胎的结构特征，因此弦或梁模型的物理参数不易确定，往往要从大量对轮胎直接进行试验取得的数据中拟合得出，例如弦模型的参数是以试验所得到的松弛长度表示的。

（3）有限元模型是基于对轮胎结构和材料的详细描述，精确的建模可以比较准确地计算出轮胎的稳态和动态响应，它是轮胎设计的重要手段之一。

但是利用有限元方式创建轮胎与地面的接触模型很复杂，虽然可以得到轮胎某些力学特性的数值解，但占用计算机资源太大，将其应用于整车动力学仿真往往是不现实的，

因此目前有限元模型主要用于轮胎设计及制造。

12.5.2　ADAMS/Tire

在 ADAMS 软件里轮胎既不是刚性体也不是柔性体，而是一组数学函数。ADAMS/Solver 通过 DIFSUB 和 GFOSUB 调用这些函数。

ADAMS/Tire 分为两大类——用于操稳分析的轮胎模型（Handling tire）；用于耐久性分析的轮胎模型（Durability tire）。

用于操稳分析的轮胎模型包括以下内容。

（1）魔术公式轮胎模型（MF-tire）。该模型由荷兰 TNO 公司开发并进行技术支持，在 ADAMS 2007 中的版本是 MF5.2。它完全支持 STI1.4，包含了稳态和非稳态的侧偏特性，根据仿真工况的不同可以在稳态和非稳态之间切换模型。TNO 自己开发了一套用于拟合 MF 轮胎模型参数的商业化软件 MF-TOOLS。魔术公式轮胎模型已经成为汽车行业中分析操稳性能的标准。它的精度很高，但是其参数的拟合需要较多的试验数据。

（2）Pacejka89 和 Pacejka94 模型。这两个模型是基于魔术公式，但是由 MSC 公司自己开发的。这两个模型在低速时有较大误差，而且由于回正力矩是直接拟合，即与侧向力没有关系，因此在大侧偏角时有较大误差，尤其是侧偏和纵滑联合工况。它们的主要区别在于 Pacejka89 采用的是 Pacejka 坐标系，Pacejka94 采用的是 SAE 坐标系。

（3）Fiala 模型。该模型是建立在弹性基础上的梁模型，不能考虑外倾，而且没有松弛长度。

（4）UA 模型。该模型可以考虑外倾和松弛长度，在只需要几个参数的情况下，能够取得非常好的精度。

（5）5.2.1 轮胎模型。该模型是 ADAMS 早期研发的轮胎模型。5.2.1 是其版本号，现在已经很少使用。

上述模型均使用点接触模型，轮胎在任何时候只有一个点与地面相互作用，即并不是真实地求解轮胎和地面的接触问题，只能用于二维路面。

在 ADAMS/Tire 中用于耐久性分析的轮胎模型（Durability tire）是三维接触模型（3D contact module），它考虑了轮胎胎侧截面（cross-section）的几何，并把轮胎沿着轮胎宽度方向离散，用等效贯穿体积的方法来计算垂直力，可以用于三维路面。该模型是一个单独的 License，但是如果用户只购买 Durability tire，将只能用 Fiala 模型计算操稳性。

除了上述两类模型之外，ADAMS/Tire 还包括 FTire 模型和 SWIFT 模型。

FTIRE（Flexible Ring Tire Model）模型是由德国 Esslingen 大学的 Michael Gipser 领导小组开发的，从名称可以看出它是基于柔性环模型的，从本质来说是一个物理模型，柔性是指与刚性相对。

图 12-59 所示为轮胎的环模型。将轮胎简化为环模型有其结构上的背景。现代轮胎基本上为子午线轮胎，子午线轮胎从结构上来看，是由高强度周向布置的带束和子午线方向布置的胎体构成，因此作为一种近似，可将其简化为弹性基础上的圆环进行分析。

其中，环代表胎冠部分，弹性基础（由径向和周向弹簧代表）代表胎侧和充气效应。圆环和刚性轮辋之间由弹簧连接。轮胎的面内动力学特性就可以借助这种模型进行分析。目前环模型已经成为轮胎力学研究的热点，也是国际上仿真轮胎在短波不平路面动特性的主流模型。

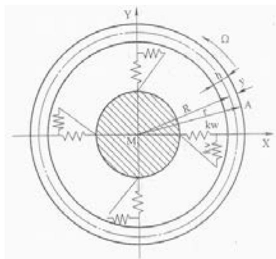


图 12-59 轮胎的环模型

SWIFT（Short Wave Intermediate Frequency Tire Model）模型是由荷兰 Delft 工业大学和 TNO 公司联合开发的。它是一个刚性环模型，所谓刚性是指在环模型的基础上只考虑轮胎的 0 阶转动和 1 阶错动这两阶模态，此时轮胎只作整体的刚体运动而并不发生变形，在只关心轮胎的中低频特性时，这样是可以满足要求的。由于不需要计算胎体的变形，刚性环模型的计算效率大大提高，可以用于硬件在环仿真进行主动悬架和 ABS 的开发。在处理面外动力学问题时，SWIFT 使用了魔术公式（Magic Formula），因此可以用于研究一些复杂的工况，例如不平路面的侧偏和 ABS 制动。在处理轮胎与地面的接触问题时，SWIFT 采用了等效路形的方法。SWIFT 模型所用的等效路形是由一个专门的包容模型算出来的。所以 SWIFT 模型要自带一个包容模型来提供等效路形，这也是它的缺点之一。

12.5.3 轮胎模型的选择

由于轮胎结构和材料的复杂性与非线性，以及使用工况的多样性，目前还没有一个轮胎模型可以适用于所有工况的仿真，每个轮胎模型都有其优点和缺点，也有其适用的范围。如果轮胎模型选择不正确，即超出了其适应的范围，就无法得到正确的结果。

下面给出几种常用轮胎模型的特点及适用范围。

（1）MF-Tire 模型。这是目前 ADAMS/Tire 中描述稳态和非稳态侧偏精度最好的模型。采用的是 ISO 坐标系，它考虑了轮胎高速旋转时的陀螺耦合、侧偏和纵滑的相互影响，以及外倾对侧偏和纵滑的影响，适用范围是，有效频率可到 8Hz，只能用于平路面（路面起伏的波长必须大于轮胎的周长）。

（2）UA 模型。由于 MF-Tire 的参数获取非常昂贵，一套参数的试验和拟合费用在 20 万左右，所以 UA 模型是目前使用较多的模型，它采用的是 SAE 坐标系，考虑了非稳态效果，侧偏和纵滑的相互影响是通过摩擦椭圆考虑的，考虑了外倾，但不能计算翻倒力矩（即绕轮胎前进方向的力矩）。

（3）FFire 模型。与经验-半经验模型不同，FFire 是物理模型。只要模型参数正确，就能够用于面内和面外的工况，它使用的是 ISO 坐标系，适用范围是，有效频率可到 120Hz，可以用于短波不平路面，即障碍物（cleat）的尺寸小于轮胎的印迹。

（4）SWIFT 模型。与 FTire 相似，它使用的是 ISO 坐标系，适用范围是，有效频率可到 60Hz，可以用于短波不平路面。

（5）PAC89 和 PAC94。这两个模型都是稳态侧偏模型，不能用于非稳态工况，有效频率可到 0.5Hz，只能用于水平路面。

12.5.4　ADAMS/Tire 的使用

在了解如何使用 ADAMS/Tire 之前，应当首先了解在 ADAMS 中轮胎模型是如何工作的。

首先，ADAMS/Solver 读取.adm 文件，找到和轮胎有关的信息后就会调用 ADAMS/Tire。ADAMS/Tire 会搜索轮胎特性文件.tir 和路面特性文件，读入轮胎模型参数并保存在静态内存中。轮胎模型会读取路面特性文件。上述过程即所谓的初始化过程。

在仿真过程中，轮胎模型会调用路面模型，获取轮胎与地面的接触点以及摩擦系数，计算与地面相互作用产生的力和力矩，并把结果作用于轴头，同时生成用于后处理的结果文件。

用户可以使用 ADAMS/Tire 提供的轮胎模型，也可以自己创建轮胎模型。关于如何创建用户自己的轮胎模型，可以参见其帮助手册。

使用 ADAMS/Tire 中的轮胎模型的操作步骤如下：

（1）定义轮胎。在不同的产品中创建轮胎的方式是不同的。但无论是什么产品，都会生成一个 ADAMS/Solver 文件（.adm），它包含了必要的 statement 来描述轮胎。描述每个轮胎模型最基本的 statement 是 GFORCE，它描述了作用于轮轴的力。

（2）指定轮胎特性文件。轮胎特性文件指定了使用 ADAMS/Tire 中的哪种轮胎模型。该文件包含了生成轮胎力和力矩所需的参数。在.adm 文件中包含了一个字符串 statement，以指向该特性文件。

（3）指定路面特性文件。路面特性文件包含的数据用以指定路形和摩擦系数。在.adm 文件中包含了一个字符串 statement，以指向该特性文件。

12.6　整车动力学仿真分析

下面介绍如何在 ADAMS/Car 环境中进行整车的动力学仿真。在 ADAMS/Car 中，整车模型必须包含如下子系统：

- 前后悬架。
- 转向系统。
- 前后轮胎。
- 车身（刚性或柔性）。

此外，ADAMS/Car 还会包含一个 Test Rig，在开环（Open-loop）、闭环（Close-loop）

和准静态分析（Quasi-static）中必须选择_MDI_SDI_TESTRIG。用户可以在整车模型中包含其他的子系统，如制动器子系统、动力总成等。下面通过 3 个实例说明如何进行整车动力学仿真。

12.6.1 单移线

（1）启动 ADAMS/Car，进入 Standard Interface 模式。

（2）单击菜单栏中的“File”→“Open”→“Assembly”命令，在弹出对话框的“Asserrmbly Name”文本框中右击鼠标，在弹出的右键菜单中单击“Search”→“<acar_shared>assemblies.tbl”→“MDI_Demo_Vehicle.asy”命令。

（3）单击“OK”按钮，打开整车模型如图 12-60 所示。

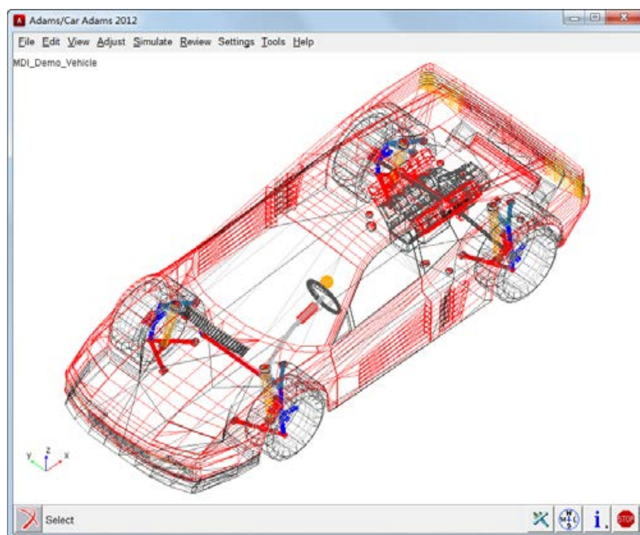


图 12-60 整车模型 MDI_Demo_Vehicle

（4）单击菜单栏中的“Simulate”→“Full-Vehicle Analysis”→“Open-loop steering events”→“Single Lane Change”命令，在弹出对话框中设置相关内容，如图 12-61 所示，并单击“OK”按钮。

（5）ADAMS/Car 求解。在求解过程中首先根据特征文件更新力元（force-element），包括弹簧和阻尼器。作为整车模型的一部分，driver test rig 会按照设定的输入对整车施加输入，在这里输入的是转向盘转角，仿真结束后单击“Close”按钮。

单移线（Single Lane Change）试验方法是研究汽车超车时瞬态闭环响应特性的一种重要试验方法，由于闭环试验的复杂性，实际中常用单正弦角代替，从而排除驾驶员主观因素的影响。一般让汽车以最高车速的 70%（或 90km/h）直线行驶，然后给方向盘一个正弦转角输入，同时记录汽车的横摆角速度、车身侧倾角、侧向加速度、质心轨迹等值。在单移线仿真中首先要考察的是车身的侧向加速度和车身的侧倾角。当有试验数据来验证模型时，这两项是考察模型正确与否的重要指标。

（6）根据换道要求，仿真中汽车以车速为“90km/h”的初始车速进行单移线输入试验仿真。正弦周期为“3.14s”，方向盘最大转角为“12.4d”。

单击菜单栏中的“Review”→“PostProcessing Windows”命令，或者按<F8>键进入后处理模块，具体仿真结果如图12-62～图12-69所示。

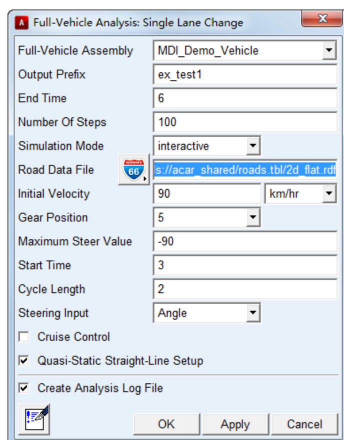


图12-61 设置单移线仿真参数

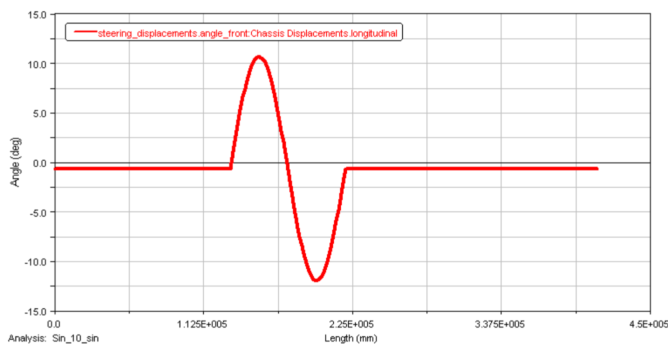


图12-62 方向盘转角

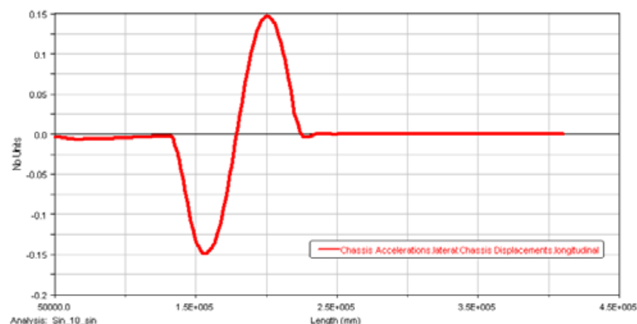


图12-63 侧向加速度响应

仿真结果表明正弦输入可以较好地表达单移线试验，该车在换道试验中有较好的操控特性。

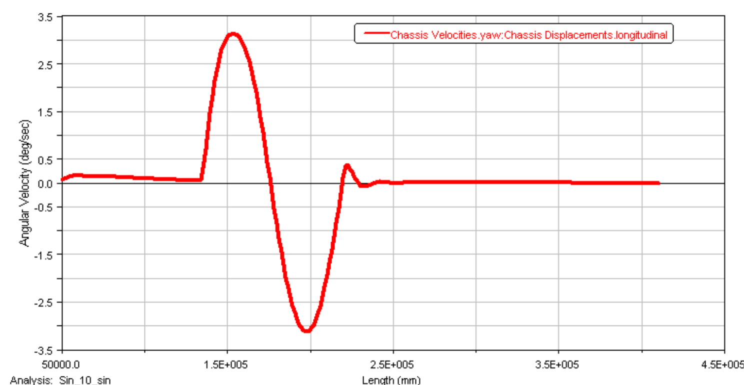


图 12-64　横摆角速度响应

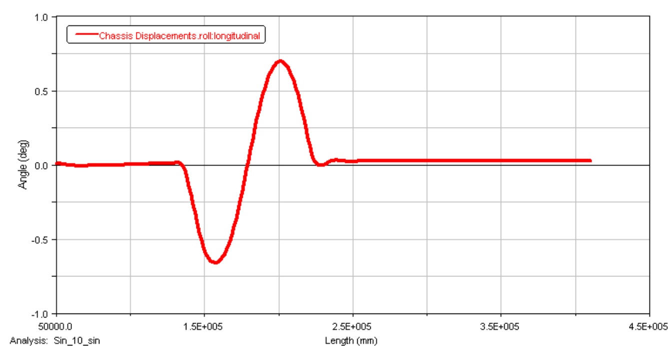


图 12-65　侧倾角响应

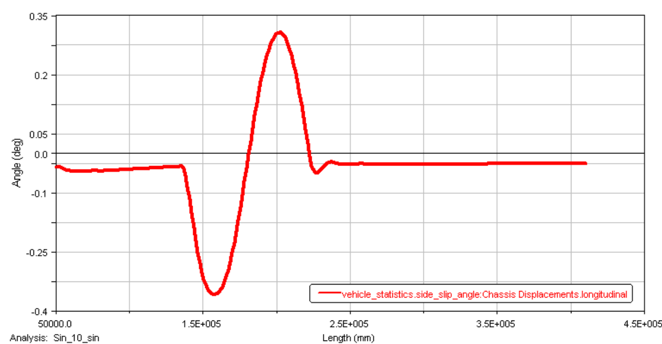


图 12-66　质心侧偏角响应

（7）以车身的侧向加速度为横坐标，考察车的方向盘转角，得到的方向盘转角-侧向加速度如图 12-70 所示。

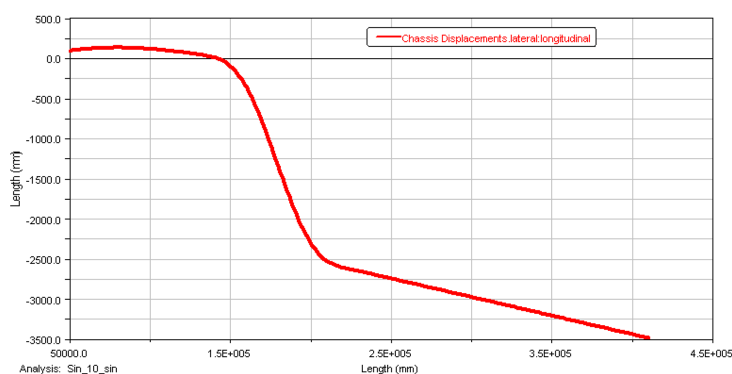


图 12-67　质心轨迹

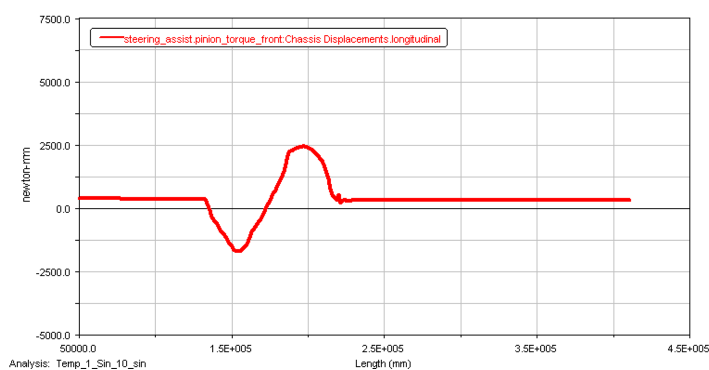


图 12-68　方向盘力矩

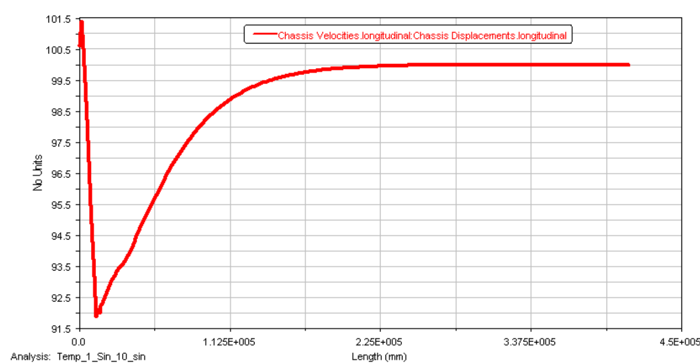


图 12-69　车速

12.6.2　常半径转向

在本例中将进行常半径转向（Constant Radius Cornering），这是在操稳分析中使用最多的分析，通过它来检验整车的不足和过多的转向特性。在分析过程中保持转弯半

径不变，改变车速从而得到不同的侧向加速度。所谓的 Quasi-Static 是指在每一个积分步长，整车系统是通过力-力矩方法来平衡静态力，即使用的是 Static 求解器，这样相对于动态分析（Dynamic analysis）计算速度更快，但是没有考虑动态效果，如换档带来的冲击（车速不是不断增加的）。仿真工况则是通过 CONSUB 实现的。其具体操作步骤如下：

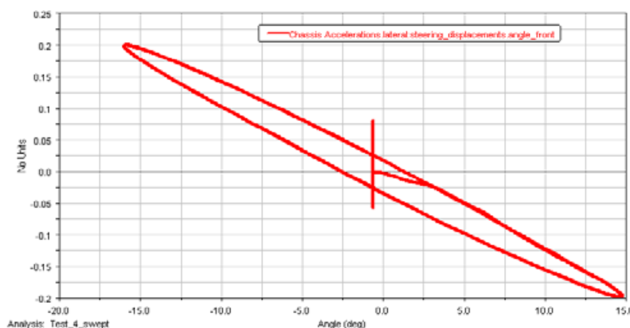


图 12-70　方向盘转角-侧向加速度图

（1）单击菜单栏中的“File”→“Open”→“Assembly”命令，在弹出对话框的“Asserrmbly Name”文本框中右击，在弹出的右键菜单中单击“Search”→“<acar_shared>assemblies.tbl”→“MDI_Demo_Vehicle.asy”命令，单击“OK”按钮。

（2）单击菜单栏中的“Simulate”→“Full-Vehicle Analysis”→“Quasi-Static analysis”→“Constant Radius Cornering”命令，在弹出的对话框中按照实际设定以后，单击“OK”按钮。

（3）ADAMS/Car 开始求解，仿真结束后单击“Close”按钮。

（4）进入 PostProcessing 查看分析结果。

汽车以大约 40Km/h 的初始车速，在半径为 42m 的圆周上稳态回转，这时汽车获得 0.3g 左右的侧向加速度，保持方向盘不动迅速制动。汽车直线行驶 50m 后，给汽车一个转向盘角阶跃输入，待行驶 10s 后，汽车响应稳定后进入稳态圆周回转，这时以阶跃形式施加制动。以不同的制动力矩进行仿真计算，得到不同制动加速度下的汽车响应仿真结果，如图 12-71～图 12-80 所示。

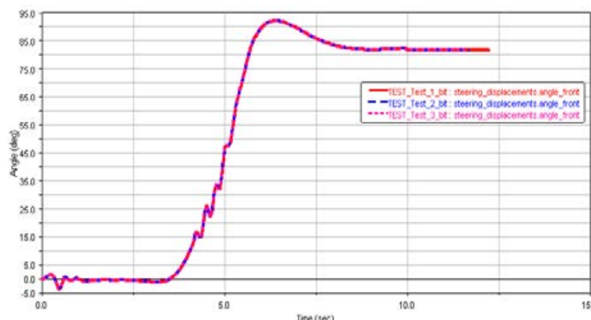


图 12-71　方向盘转角

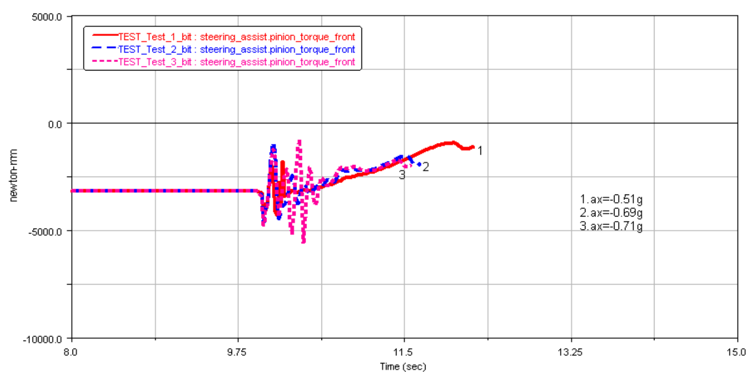


图 12-72　方向盘转矩

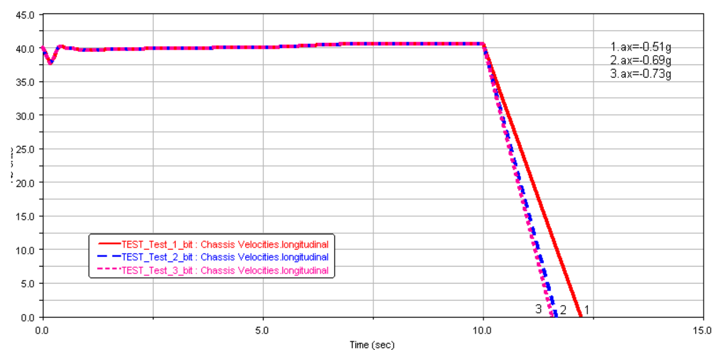


图 12-73　车速

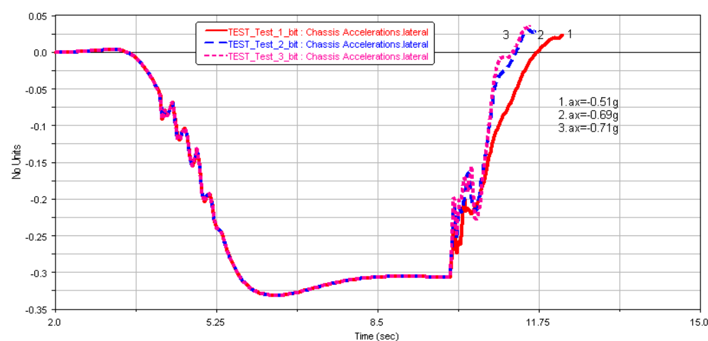


图 12-74　侧向加速度响应

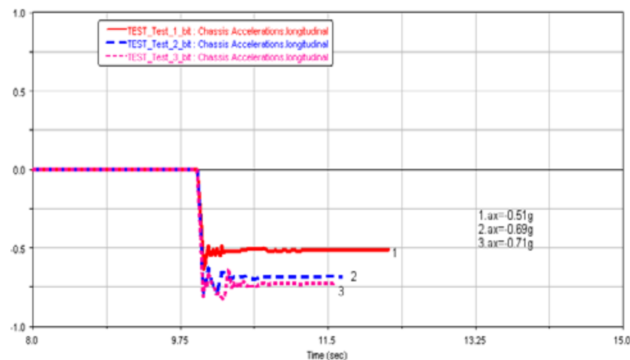


图 12-75　制动减速度

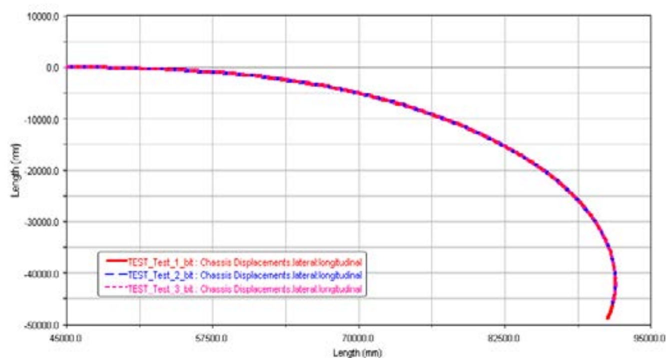


图 12-76　质心轨迹

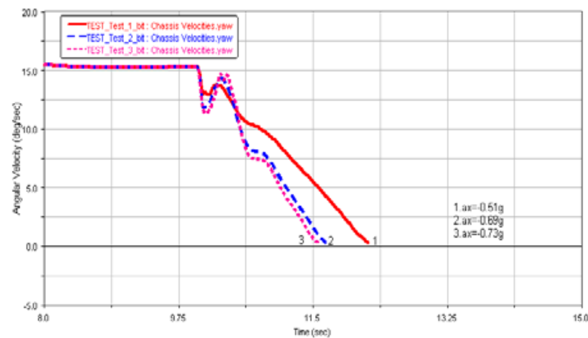


图 12-77　横摆角速度响应

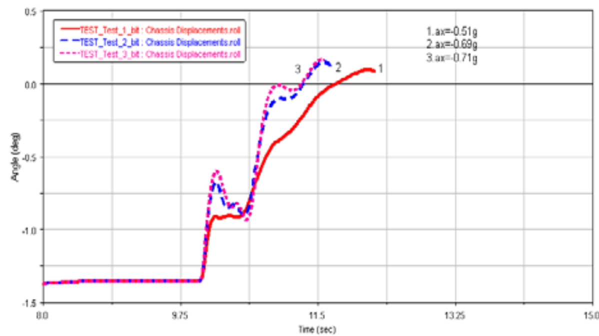


图 12-78　侧倾角响应

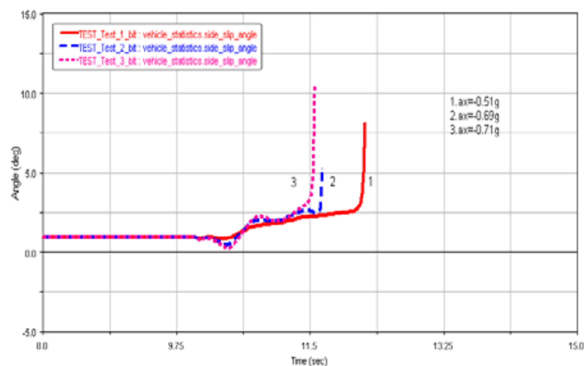


图 12-79　质心侧偏角响应

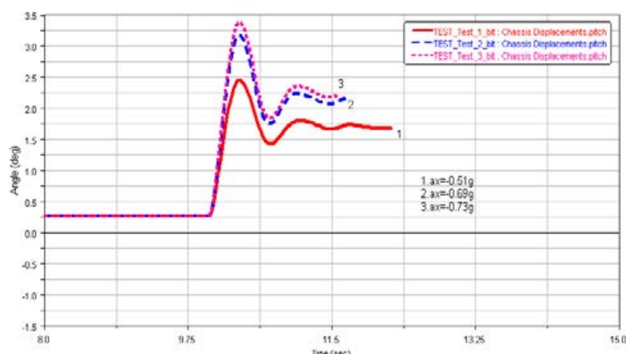


图 12-80　车身俯仰角

12.6.3　双移线仿真

在本例中将进行双移线仿真（ISO Lane change），即车辆按照 ISO3888 规定的路径进行仿真。该分析属于操稳的极限工况，分析车辆在紧急避障时，侧翻（Rollover）的可能。路径控制是通过驱动样机（Drivingmachine）实现的，有两个控制器，一个纵向，一个侧向，分别控制车辆的速度和路径。ADAMS/Car 通过一个外部文件 iso_lane_change.dcd 定义车辆的路径，具体操作步骤如下。

（1）单击菜单栏中的“File”→“Open”→“Assembly”命令，在弹出对话框的“Asserrmbly Name”文本框中右击，在弹出的右击菜单中单击“Search”→“<acar_shared>assemblies.tbl”→“MDI_Demo_Vehicle.asy”命令，单击“OK”按钮。

（2）单击菜单栏中的“Simulate”→“Full-Vehicle Analysis”→“Course Events”→“ISO lane change”命令，在弹出的对话框中设置相关内容，如图 12-81 所示，并单击“OK”按钮。

（3）ADAMS/Car 开始求解，仿真结束后单击“Close”按钮，进入 PostProcessing 查看分析结果。

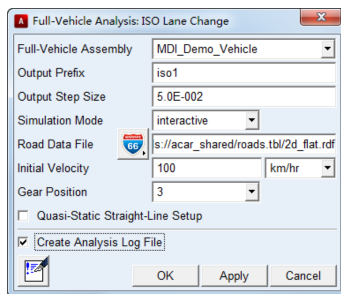


图 12-81　设置双移线仿真参数

试验证明，对汽车制动稳定性最敏感的运动参数是横摆加速度响应。所以，以横摆角速度在制动过程中的响应为评价参数，并以制动过程中横摆角速度响应的最大值 Rmax 和初始稳态回转的稳定值 r0（15.24deg/s）之比 Rmax/r0 作为评价指标（在制动减速度

为 0.81g 时，出现峰值），得到表 12-4 所示的结果。

表 12-4　不同制动减速度时的评价参数

制动减速度（g）	Rmax（deg/s）	Rmax/r_0
0.51	13.77	0.90
0.69	14.33	0.94
0.73	14.74	0.97

12.7 ADAMS/Insight 在 ADAMS/Car 中的使用

本节介绍 ADAMS/Insight 在 ADAMS/Car 中的使用。

（1）启动 ADAMS/Car，创建一个新的前悬架总成。单击菜单栏中的“File”→“New”→“Suspension Assembly”命令，弹出“New Suspension Assembly”对话框。在“Assembly Name”文本框中输入“ainsight_susp”，其他设置如图 12-82 所示。

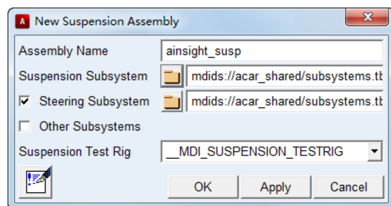


图 12-82　打开“New Suspension Assembly”对话框

（2）单击“OK”按钮，得到如图 12-83 所示的前悬架总成。

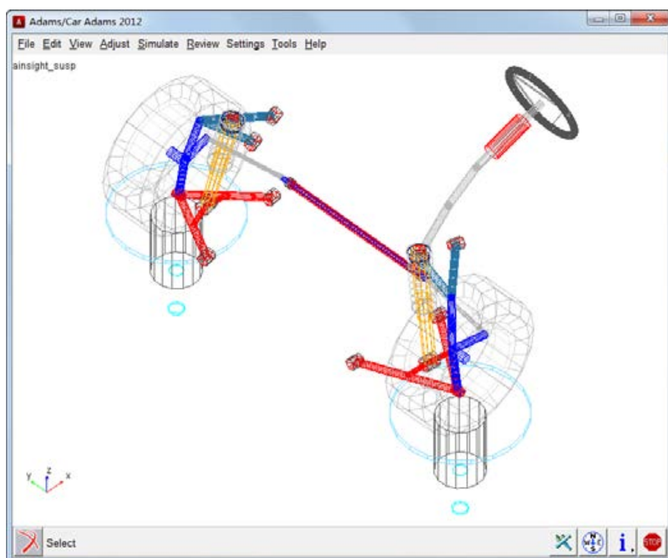


图 12-83　前悬架总成

（3）在进行 DOE 之前，先进行一个车轮同向上下跳动（parallel travel analysis）的仿真。这样做的目的是创建一个 Script 用于后面的 ADAMS/Insight 试验，以及检验当前的设计方案是否可以得到合理结果。

单击菜单栏中的“Simulate”→“Suspension Analysis”→“Parallel Wheel Travel”命令，在弹出的对话框中进行仿真设置，如图 12-84 所示，设置完毕单击“OK”按钮，开始仿真。

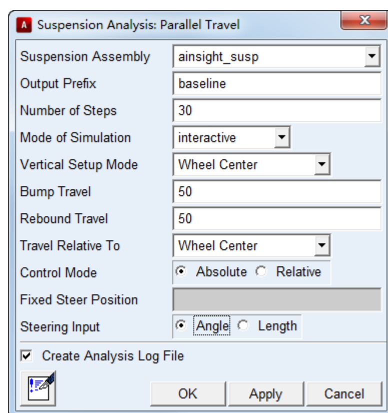


图 12-84　仿真设置

下面在 ADAMS/Car 下创建设计目标（Design Objective）。

（4）在 ADAMS/Car 界面中，单击菜单栏中的“Simulate”→“DOE Interface”→“Design Objective”→“New”命令，系统弹出 “create Design Objective”对话框。在“Result Set Camp”文本框中右击，在弹出的右键菜单中单击“Guesses”→“PSI”命令，其他设置如图 12-85 所示，设置完毕单击“OK”按钮。

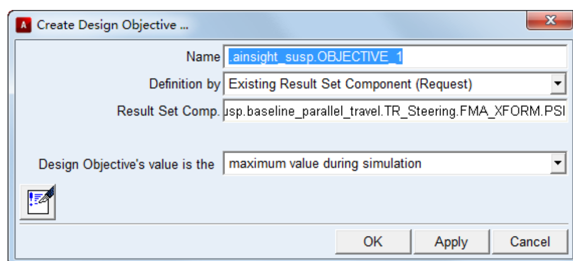


图 12-85　“Create Design Objective”对话框

下面将从 ADAMS/Car 中启动 ADAMS/Insight，通过试验来评价模型的性能。

（5）在 ADAMS/Car 界面，单击菜单栏中的“Simulate”→“DOE Interface”→“ADAMS/Insight”→“Export”命令，在弹出的对话框中保持默认设置，单击“OK”按钮，启动 ADAMS/Insight，如图 12-86 所示，可以看到 ADAMS/Car 自动创建了很多设计因素。与 ADAMS/View 不同的是除了硬点之外，很多 ADAMS/Car 的实体（entity）会自动创建为设计因素，包括 bushing（刚度、阻尼、预载荷、初始位移等）、弹簧刚度、阻尼器的阻

尼、限位块的力等。

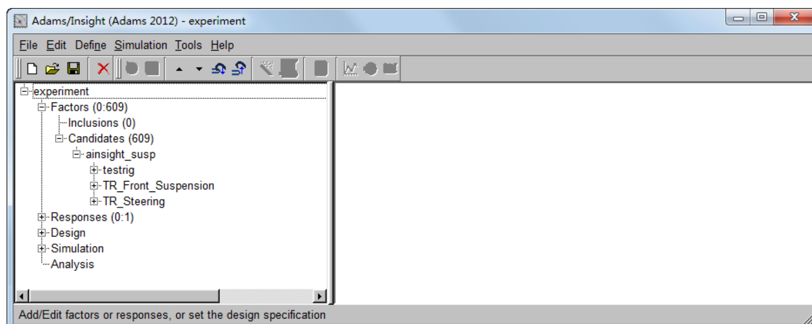


图 12-86　启动 ADAMS/Insight

（6）连续选中硬点“tierod_outer”的 3 个坐标，在左边的树状列表中选择“TR_Front_suspension\ground”，然后单击工具栏中的按钮，将其包含为设计因素。设定设计因素的特性“hpl_tierod_outer.x”，如图 12-87 所示。hpl_tierod_outer.y 和 hpl_tierod_outer.z 采用类似的设置，只是要采用适当的缩写。

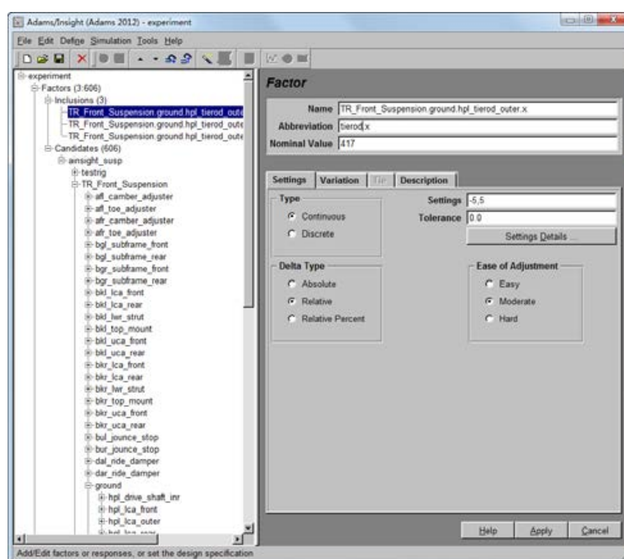


图 12-87　设定设计因素的特性

（7）在“Response”树状列表中选择“OBJECTIVE_1”，然后单击工具栏中的按钮，将其包含为响应，设定其属性，如图 12-88 所示。

（8）设定设计内容（Design Specifications），如图 12-89 所示。

（9）创建工作空间（Work Space），得到图 12-90 中部分因素的工作空间矩阵。

（10）运行试验。仿真结束后，返回到 ADAMS/Insight 中，查看结果。在 ADAMS/Car 界面，单击菜单栏中的“Simulate”→“DOE Interface”→“ADAMS/Insight”→“Display”命令，在弹出的对话框中输入试验名“experiment”。

（11）在左边的树状列表中选择“Work Space”，得到响应值。

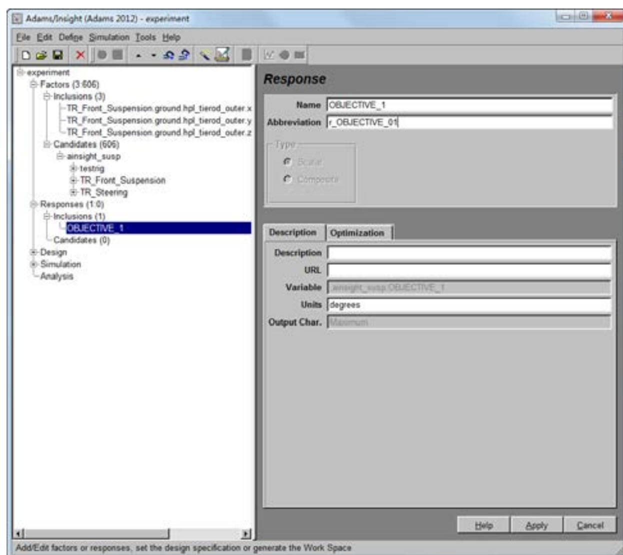


图 12-88　响应的设定

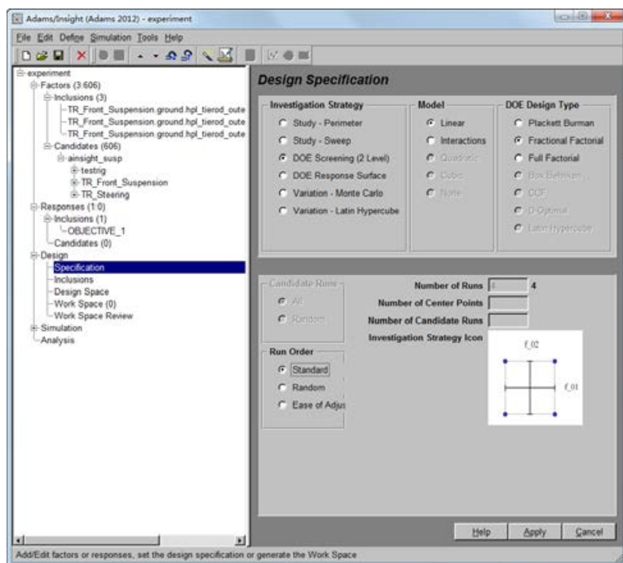


图 12-89　设定设计内容

（12）拟合结果。在“Regression”树状列表中选择“OBJECTIVE_1”，在“Display”列表中选择统计特性来评价拟合结果，例如选择“Fit”，如图 12-91 所示。

（13）把拟合结果发布为“HTML”。在左边的树状列表中选择“Analysis”→“Model_01”。从工具栏中单击（Web 发布）按钮，导出模型为“HTML”格式。用 IE 浏览器打开导出的 HTML 文件，如图 12-92 所示。用户可以改变设计因素的值，得到当前的响应值。

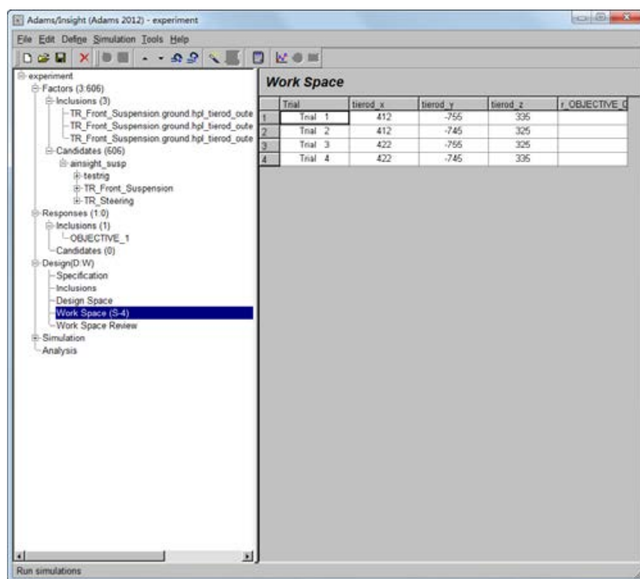


图 12-90　创建工作空间

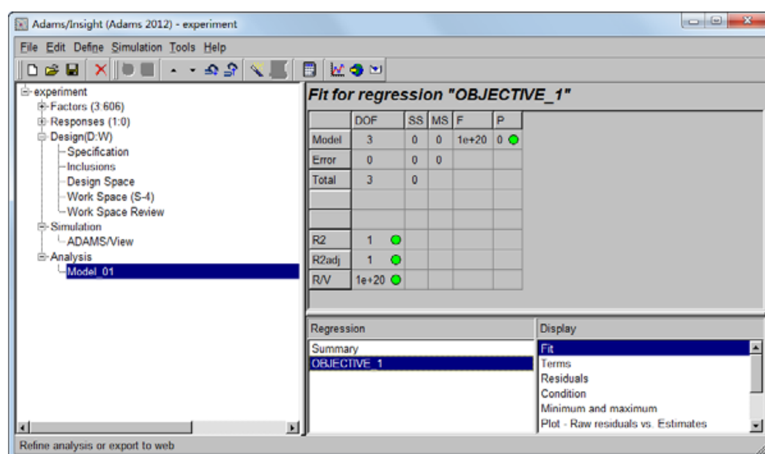
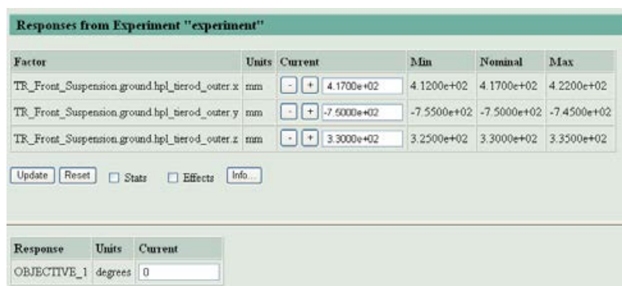


图 12-91　评价拟合结果



Responses from Experiment "experiment"

Factor	Units	Current	Min	Nominal	Max
TR_Front_Suspension.ground.hpl_tierod_outer.x	mm	4.1700e+02	4.1200e+02	4.1700e+02	4.2200e+02
TR_Front_Suspension.ground.hpl_tierod_outer.y	mm	-7.5000e+02	-7.5500e+02	-7.5000e+02	-7.4500e+02
TR_Front_Suspension.ground.hpl_tierod_outer.z	mm	3.3000e+02	3.2500e+02	3.3000e+02	3.3500e+02

Update　Reset　Stats　Effects　Info...

Response	Units	Current
OBJECTIVE_1	degrees	0

图 12-92　拟合结果的 Web Page 形式

附录 A　设计过程函数

表 A-1　数学函数

函　　数	功　　能
ABS(x)	数字表达式 x 的绝对值
DIM(x1,x2)	x1>x2 时，返回 x1 与 x2 之间的差值；x1<x2 时，返回 0
EXP(x)	数字表达式 x 的指数值
LOG(x)	数字表达式 x 的自然对数值
LOG10(x)	数字表达式 x 以 10 为底的对数值
MAG(x,y,z)	求向量[x，y，z]的模
MOD(x1,x2)	数字表达式 x1 对另一个数字表达式 x2 取余数
RAND(x)	返回 0 到 1 之间的随机数
SIGN(x1,x2)	符号函数，当 x2>0 时，返回 ABS(x)；当 x2<0 时，返回-ABS(x)
SQRT(x)	数字表达式 x 的平方根值
SIN(x)	数字表达式 x 的正弦值
SINH(x)	数字表达式 x 的双曲正弦值
COS(x)	数字表达式 x 的余弦值
COSH(x)	数字表达式 x 的双曲余弦值
TAN(x)	数字表达式 x 的正切值
TANH(x)	数字表达式 x 的双曲正切值
ASIN(x)	数字表达式 x 的反正弦值
ACOS(x)	数字表达式 x 的反余弦值
ATAN(x)	数字表达式 x 的反正切值
ATAN2(x1,x2)	两个数字表达式 x1、x2 的四象限反正切值
INT(x)	数字表达式 x 取整
AINT(x)	数字表达式 x 向绝对值小的方向取整
ANINT(x)	数字表达式 x 向绝对值大的方向取整
CEIL(x)	数字表达式 x 向正无穷的方向取整
FLOOR(x)	数字表达式 x 向负无穷的方向取整
NINT(x)	最接近数字表达式 x 的整数值
RTOI(x)	返回数字表达式 x 的整数部分

表 A-2　位置和方向函数

函　　数	功　　能
LOC_ALONG_LINE	返回两点连线上与第一点距离为指定值的点

LOC_CYLINDRICAL	将圆柱坐标系下坐标值转化为笛卡儿坐标系下坐标值
LOC_FRAME_MIRROR	返回指定点关于指定坐标系下平面的对称点
LOC_GLOBAL	返回参考坐标系下的点在全局坐标系下的坐标值
LOC_INLINE	将一个参考坐标系下的坐标值转化为另一参考坐标系下的坐标值，并归一化
LOC_LOC	将一个参考坐标系下的坐标值转化为另一参考坐标系下的坐标值
LOC_LOCAL	返回全局坐标系下的点在参考坐标系下的坐标值
LOC_MIRROR	返回指定点关于指定坐标系下平面的对称点
LOC_ON_AXIS	沿轴线方向平移
LOC_ON_LINE	返回两点连线上与第一点距离为指定值的点
LOC_PERPENDICULAR	返回平面法线上距离指定点单位长度的点
LOC_PLANE_MIRROR	返回特定点关于指定平面的对称点
LOC_RELATIVE_TO	返回特定点在指定坐标系下的坐标值
LOC_SPHERICAL	将球面坐标转化为笛卡儿坐标
LOC_X_AXIS	坐标系 x 轴在全局坐标中的单位矢量
LOC_Y_AXIS	坐标系 y 轴在全局坐标中的单位矢量
LOC_Z_AXIS	坐标系 z 轴在全局坐标中的单位矢量
ORI_ALIGN_AXIS	将坐标系按指定方式旋转至与指定方向对齐所需旋转的角度
ORI_ALONG_AXIS_EUL	将坐标系按指定方式旋转至与全局坐标系一个轴方向对齐所需旋转的角度
ORI_ALL_AXES	将坐标系旋转至由平面上的点定义的特定方向（第一轴与指定平面上两点连线平行，第二轴与指定平面平行）时所需旋转的角度
ORI_ALONG_AXIS	将坐标系旋转至其一轴线沿指定轴线方向时所需旋转的角度
ORI_FRAME_MIRROR	返回坐标系旋转镜像到指定坐标系下所需旋转的角度
ORI_GLOBAL	返回参考坐标系在全局坐标系下的角度值
ORI_IN_PLANE	将坐标系旋转至特定方向（与指定两点连线平行、与指定平面平行）时所需旋转的角度
ORI_LOCAL	返回全局坐标系在参考坐标系下的角度值
ORI_MIRROR	返回坐标系旋转镜像到指定坐标系下所需旋转的角度
ORI_ONE_AXIS	将坐标系旋转至其一轴线沿两点连线方向时所需旋转的角度
ORI_ORI	将一个参考坐标系转化为另一参考坐标系所需旋转的角度
ORI_PLANE_MIRROR	返回坐标系旋转生成关于某平面的镜像所需旋转的角度
ORI_RELATIVE_TO	返回全局坐标系下角度值相对指定坐标系的旋转角度

表 A-3　建模函数

函　　数	功　　能
DM	返回两点之间的距离
DX	返回在指定参考坐标系中两点间的 x 坐标值之差

DY	返回在指定参考坐标系中两点间的 y 坐标值之差
DZ	返回在指定参考坐标系中两点间的 z 坐标值之差
AX	返回在指定参考坐标系中两点间关于 x 轴的角度差
AY	返回在指定参考坐标系中两点间关于 y 轴的角度差
AZ	返回在指定参考坐标系中两点间关于 z 轴的角度差
PSI	按照 313 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第一旋转角度
THETA	按照 313 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第二旋转角度
PHI	按照 313 旋转系列，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第三旋转角度
YAW	按照 321 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第一旋转角度
PITCH	按照 321 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第二旋转角度的相反数
ROLL	按照 321 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第三旋转角度

表 A-4　字符串函数

函　　数	功　　能
STATUS_PRINT	将文本字符串返回到状态栏
STR_CASE	将字符串按指定方式进行大小写变换
STR_CHR	返回 ASCII 码为指定值的字符
STR_COMPARE	返回两字符在字母表上的位置差
STR_DATE	按一定格式输出当前时间和日期
STR_DELETE	从字符串中一定位置开始删除指定个数的字符
STR_FIND	返回字符串在另一字符串中的位置索引
STR_FIND_COUNT	返回字符串在另一字符串中出现的次数
STR_FIND_N	返回字符串在另一字符串中重复出现指定次数时的位置索引
STR_INSERT	将字符串插入到另一字符串的指定位置
STR_IS_SPACE	判断字符串是否为空
STR_LENGTH	返回字符串长度
STR_MATCH	判断字符串中所有字符是否均可以在另一字符串中找到

表 A-5　矩阵和数组函数

函　　数	功　　能
ALIGN	将数组转换到从特定值开始
ALLM	返回矩阵元素的逻辑值
ANGLES	将方向余弦矩阵转换为指定旋转顺序下的角度矩阵
ANYM	返回矩阵元素的逻辑和
APPEND	将一个矩阵中的行添加到另一个矩阵
CENTER	返回数列最大、最小值的中间值

CLIP	返回矩阵的一个子阵
COLS	返回矩阵列数
COMPRESS	压缩数组、删除其中的空值元素（零、空字符及空格）
CONVERT ANGLES	将 313 旋转顺序转化为用户自定义的旋转顺序
CROSS	返回两矩阵的向量积
DET	返回方阵 M 的行列式值
DIFF	返回给定数据组的逼近值
DIFFERENTIATE	曲线微分
DMAT	返回对角线方阵
DOT	返回两矩阵的内积
ELEMENT	判断元素是否属于指定数组
EXCLUDE	删除数组中某元素
FIRST	返回数组的第一个元素
FIRST_N	返回数组的前 N 个元素
INCLUDE	向数组中添加元素
INTEGR	返回数据积分的逼近值
INTERATE	拟合样条曲线后再积分
INVERSE	方阵求逆
LAST	返回矩阵最后一个元素
LAST_N	返回矩阵最后 N 个元素
MAX	返回矩阵元素的最大值
MAXI	返回矩阵元素最大值的位置索引
MEAN	返回矩阵元素的平均值
MIN	返回矩阵元素的最小值
MINI	返回矩阵元素最小值的位置索引
NORM2	返回矩阵元素平方和的平方根
NORMALIZE	矩阵归一化处理
RECTANGULAR	返回矩阵所有元素的值
RESAMPLE	按照指定内插算法对曲线重新采样
RESHAPE	按指定行数、列数提取矩阵元素，生成新矩阵
RMS	计算矩阵元素的均方根值
ROWS	返回矩阵行数
SERIES	按指定初值、增量和数组长度生成数组
SERIES2	按指定初值、终值和增量数生成数组
SHAPE	返回矩阵行数、列数
SIM_TIME	返回仿真时间

SORT	依据一定顺序对数组元素排序
SORT_BY	依据一定的排列位置索引对数组元素排序
SORT_INDEX	依据一定顺序的数组元素排列位置索引
SSQ	返回矩阵元素平方和
STACK	合并相同列数的矩阵成一个新矩阵
STEP	生成阶跃曲线
SUM	矩阵元素求和
TILDE	数组的 TILDE 函数
TMAT	符合指定方向顺序的变换矩阵
TRANSPOSE	求矩阵转置
UNIQUE	删除矩阵中的重复元素
VAL	返回数组中与指定值最接近的元素
VALAT	返回数组中与另一数组指定位置对应处的元素
VALI	返回数组中与指定数值最接近元素的位置索引
AKIMA_SOLINE	使用 Akima 迭代插值法生成内插样条曲线
CSPLINE	生成三次内插样条曲线
CUBIC_SPLINE	生成三阶内插多项式曲线
DETREND	返回最小二乘拟合曲线与输入数据的差值
HERMITE_SPLINE	使用荷尔米特插值法生成内插样条曲线
LINEAR_SPLINE	线性插值生成内插样条曲线
NOTAKNOT_SPLINE	生成三次光顺连续插值样条曲线
SPLINE	生成插值样条曲线
FFTMAG	返回快速傅立叶变换后的幅值
FFTPHASE	返回快速傅立叶变换后的相位
FILTER	返回按指定格式滤波处理后的数据
FREQUENCY	返回快速傅立叶变换频率数
HAMMING	采用 HAMMING 窗处理数据
HANNING	采用 HANNING 窗处理数据
WELCH	采用 WELCH 窗处理数据
PSD	计算功率谱密度

表 A-6　数据库函数

函　　数	功　　能
DB_CHANGED	标记数据库元素是否被修改
DN_CHILDREN	查询对象中符合指定类型的子对象
DB_COUNT	查询对象中给定域数值的个数

DB_DEFAULT	查询指定类型的默认对象
DB_DELETE_DEPENDENTS	返回与指定对象具有相关性的对象数组
DB_DEPENDENTS	返回与指定对象具有相关性且属于指定类型的所有对象
DB_EXIT	判断指定字符串表示的对象是否存在
DB_FIELD_FILTER	将对象按指定方式过滤
DB_FIELD_TYPE	返回在指定对象域中数据类型的字符串
DB_FILTER_NAME	名称满足指定过滤参数的对象字符串
DB_FILTER_TYPE	数据类型满足指定过滤参数的对象字符串
DB_IMMEDIATE_CHILDREN	返回属于指定对象子层的所有对象数组
DB_OBJECT_COUNT	返回名称与指定值相同的对象个数
DB_OF_CLASS	判断对象是否属于指定类别

表 A-7　GUI 函数组

函　　数	功　　能
ALERT	返回自定义标题的警告对话框
FILE_ALERT	返回自定义文件名的警告对话框
SELECT_FIELD	返回按指定对象类型确定的域
SELECT_FILE	返回符合指定格式选项的文件名
SELECT_MULTI_TEXT	返回多个选定字符串
SELECT_OBJECT	返回一个按指定路径、名称和类型确定的对象
SELECT_OBJECTS	返回所有按指定路径、名称和类型确定的对象
SELECT_TEXT	返回单个选定字符串
SELECT_TYPE	返回指定类型对象的列表
TABLE_COLUMN_SELECTED_CELLS	返回选定的某单元在表格给定列中所在行的位置
TABLE_GET_CELLS	返回在表格指定行、列范围内满足指定条件的内容
TABLE_GET_DIMENSION	返回指定表格的行数或列数

表 A-8　系统函数组

函　　数	功　　能
CHDIR	判断是否成功转换到指定目录
EXECUTE_VIEW_COMMAND	判断是否成功执行 ADAMS/View
FILE_EXISTS	判断是否存在指定文件
FILE_TEMP_NAME	返回一个临时文件名
GETCWD	返回当前工作路径
GETENV	返回表示环境变量值的字符串
MKDIR	判断是否成功创建自定义路径

PUTENV	判断是否成功设置环境变量
REMOVE_FILE	判断是否成功删除指定文件
RENAME_FILE	判断是否成功更改文件名
SYS_INFO	返回系统信息
UNIQUE_FILE_NAME	返回文件名

附录 B　运行过程函数

表 B-1　位移函数

函　　数	功　　能
DX	返回位移矢量在坐标系 x 轴方向的分量
DY	返回位移矢量在坐标系 y 轴方向的分量
DZ	返回位移矢量在坐标系 z 轴方向的分量
DM	返回位移距离
AX	返回一指定标架绕另一标架 x 轴旋转的角度
AY	返回一指定标架绕另一标架 y 轴旋转的角度
AZ	返回一指定标架绕另一标架 z 轴旋转的角度
PSI	按照 313 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第一旋转角度
THETA	按照 313 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第二旋转角度
PHI	按照 313 旋转系列，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第三旋转角度
YAW	按照 321 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第一旋转角度
PITCH	按照 321 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第二旋转角度的相反数
ROLL	按照 321 旋转顺序，返回指定坐标系相对于参考坐标系的第三旋转角度

表 B-2　速度函数

函　　数	功　　能
VX	返回两标架相对于指定坐标系的速度矢量差在 x 轴的分量
VY	返回两标架相对于指定坐标系的速度矢量差在 y 轴的分量
VZ	返回两标架相对于指定坐标系的速度矢量差在 z 轴的分量
VM	返回两标架相对于指定坐标系的速度矢量差的幅值
VR	返回两标架的径向相对速度
WX	返回两标架的角速度矢量差在 x 轴的分量
WX	返回两标架的角速度矢量差在 y 轴的分量
WX	返回两标架的角速度矢量差在 z 轴的分量
WM	返回两标架的角速度矢量差的幅值

表 B-3　接触函数

函　　数	功　　能
IMPACT	生成单侧碰撞力
BISTOP	生成双侧碰撞力

表 B-4 加速度函数

函 数	功 能
ACCX	返回两标架相对于指定坐标系的加速度矢量差在 x 轴的分量
ACCY	返回两标架相对于指定坐标系的加速度矢量差在 y 轴的分量
ACCZ	返回两标架相对于指定坐标系的加速度矢量差在 z 轴的分量
ACCM	返回两标架相对于指定坐标系的加速度矢量差的幅值
WDTX	返回两标架的角加速度矢量差在 x 轴的分量
WDTY	返回两标架的角加速度矢量差在 y 轴的分量
WDTZ	返回两标架的角加速度矢量差在 z 轴的分量
WDTM	返回两标架的角加速度矢量差的幅值

表 B-5 样条函数

函 数	功 能
CUBSPL	标准三次样条函数插值
CURVE	B 样条拟合或用户定义拟合
AKISPL	根据 Akima 拟合方式得到的插值

表 B-6 作用力函数

函 数	功 能
JOINT	返回运动副上的连接力或力矩
MOTION	返回由于运动约束而产生的力或力矩
PTCV	返回点线接触运动副上的力或力矩
CVCV	返回线线接触运动副上的力或力矩
JPRIM	返回基本约束引起的力或力矩
SFORCE	返回单个作用力施加在一个或一对构件上引起的力或力矩
VFORCE	返回 3 个方向组合力施加在一个或一对构件上引起的力或力矩
VTORQ	返回 3 个方向组合力矩施加在一个或一对构件上引起的力或力矩
GFORCE	返回 6 个方向组合力（力矩）施加在一个或一对构件上引起的力或力矩
NFORCE	返回一个由多点作用力施加在一个或一对构件上引起的力或力矩
BEAM	返回由梁连接施加在一个或一对构件上引起的力或力矩
BUSH	返回由衬套连接施加在一个或一对构件上引起的力或力矩
FIELD	返回一个由场力施加在一个或一对构件上引起的力或力矩
SPDP	返回一个由弹簧阻尼器施加在一个或一对构件上引起的力或力矩

表 B-7　合力函数

函　　数	功　　能
FX	返回两标架间作用的合力在 *x* 轴上的分量
FY	返回两标架间作用的合力在 *y* 轴上的分量
FZ	返回两标架间作用的合力在 *z* 轴上的分量
FM	返回两标架间作用的合力
TX	返回两标架间作用的合力矩在 *x* 轴上的分量
TY	返回两标架间作用的合力矩在 *y* 轴上的分量
TZ	返回两标架间作用的合力矩在 *z* 轴上的分量
TM	返回两标架间作用的合力矩

表 B-8　数学函数

函　　数	功　　能
CHEBY	计算切比雪夫多项式
FORCOS	计算傅立叶余弦级数
FORSIN	计算傅立叶正弦级数
HAVSIN	定义半正矢阶跃函数
INVPSD	依据功率谱密度生成时域信号
MAX	计算最大值
MIN	计算最小值
POLY	计算标准多项式
SHF	计算简谐函数
STEP	三次多项式逼近阶跃函数
STEP5	5 次多项式逼近阶跃函数
SWEEP	返回按指定格式生成的变频正弦函数

表 B-9　数据单元存取

函　　数	功　　能
VARVAL	返回状态变量的当前值
ARYVAL	返回数组中指定元素的值
DIF	返回微分方程所定义变量的积分值
DIF1	返回微分方程所定义变量的值
PINVAL	返回输入信号中指定元素的运行值
POUVAL	返回输出信号中指定元素的运行值

ADAMS 2012 虚拟样机从入门到精通

计算机辅助分析(CAE)系列

JISUANJIFUZHUFENGXI(CAE)XILIE



Patran 2010与Nastran 2010有限元分析从入门到精通

SolidWorks 2012中文版有限元、动力学与流场分析从入门到精通

UG NX 8.0动力学与有限元分析从入门到精通

Creo Parametric 2.0动力学与有限元分析从入门到精通

ADAMS 2012虚拟样机从入门到精通

HyperWorks 11.0有限元分析从入门到精通

ABAQUS 6.11有限元分析从入门到精通

MATLAB 2012科学计算与工程分析从入门到精通

AME Sim R10多学科复杂系统仿真从入门到精通

责任编辑：曲彩云

封面设计：王 玮

上架指导：计算机 CAD/CAM/CAE

ISBN 978-7-111-42513-7

地 址：北京市百万庄大街22号 邮政编码：100037

电话服务

社服务中心：(010)88361066

销 售 一 部：(010)68326294

销 售 二 部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

网络服务

教 材 网：http://www.cmpedu.com

机工官网：http://www.cmpbook.com

机工官博：http://weibo.com/cmp1952

封面无防伪标均为盗版



定价：59.00元（含1DVD）